

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Boris Righi**

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Prof. dr. sc. Ivica Smojver, dipl. ing.

Student:

Boris Righi

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru rada prof. dr. sc. Ivici Smojveru na pruženoj pomoći, vremenu i korisnim savjetima. Također se želim zahvaliti doc. dr. sc. Darku Ivančeviću na stalnoj dostupnosti tijekom izrade diplomskog rada i savjetima o korištenju programskog paketa Abaqus.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Janošu Kodvanju što mi je dozvolio korištenje opreme Laboratorija za eksperimentalnu mehaniku, te doc. dr. sc. Zvonimiru Tomičeviću na stručno provedenim ispitivanjima i savjetima za obradu rezultata istih.

Zahvaljujem se tvrtki Rimac Automobili na ustupljenim materijalima i resursima za izradu diplomskog rada te kolegama iz tvrtke koji su me svojim savjetima izvukli iz neznanja.

Velika zahvala ide mojim roditeljima Mariju i Sanji, sestrama Nini i Danijeli te djevojci Zdravki, kao i cijeloj obitelji na tome što su mi bili velika podrška tijekom cijelog školovanja i studiranja.

Boris Righi



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Boris Righi** Mat. br.: 0035184752

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Numeričko modeliranje popuštanja kompozitnih epruveta karakterističnih za automobilske konstrukcije**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Numerical Modelling of Composite Coupons Applied in Automotive Structures**

### Opis zadatka:

Izvršiti pregled tehničkih rješenja koja se koriste kod automobilskih kompozitnih konstrukcija kao i navesti specifičnosti njihove primjene.

U sljedećoj fazi rada, izvršiti numeričku analizu mehaničkog ponašanja kompozitnih materijala koji se koriste u istim. Analizu izvršiti kao statičku, materijalno linearnu i geometrijski nelinearnu. Pri modeliranju koristiti odgovarajuće ljuskaste konačne elemente ili 3D elemente (po potrebi).

Za odgovarajući broj epruveta materijala kod kojih je variran raspored kompozitnih slojeva, izvršiti numeričko određivanje vlačne prekidne čvrstoće. Validaciju rezultata izvršiti usporedbom s dostupnim eksperimentalnim podacima u literaturi ili, ukoliko je moguće, provođenjem eksperimenata na kidalici. Izvršiti statističku analizu podobnosti dobivenih rezultata te procijeniti najnepovoljniji slučaj pri usporedbi numeričkih i eksperimentalnih vrijednosti.

Pri definiranju prekidne čvrstoće koristiti odgovarajuće kriterije popuštanja i loma koji su dostupni u računalnom programu Abaqus, te po potrebi isprogramirati nove korištenjem korisničkog potprograma UMAT. Usporediti odstupanja koja nastaju primjenom različitih kriterija popuštanja.

Numeričku analizu izvršiti korištenjem programa Abaqus/Standard te izvršiti usporedbu s rezultatima dobijenim u programu Hyperworks.

U radu navesti korištenu literaturu te eventualnu dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

11. svibnja 2017.

Rok predaje rada:

13. srpnja 2017.


Predviđeni datum obrane:

19., 20. i 21. srpnja 2017.

Zadatak zadao:

Predsjednica Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Ivica Smojver

  
Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD.....	1
1.1. Upotreba kompozitnih konstrukcija u automobilima.....	3
1.2. Osnovni izrazi iz mehanike kompozitnih materijala.....	7
1.2.1. Jednosmjerni slojevi.....	7
1.2.2. Tkanja .....	8
1.2.3. Kriteriji popuštanja kompozitnih materijala .....	10
1.2.3.1. Kriterij maksimalnih naprezanja.....	11
1.2.3.2. Tsai – Hill kriterij.....	11
1.2.3.3. Tsai – Wu kriterij .....	12
1.3. Cilj rada.....	13
2. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA.....	14
2.1. Proizvodnja uzoraka.....	15
2.1.1. Epruvete od jednosmjernih slojeva .....	16
2.1.2. Epruvete od tkanja .....	18
2.2. Ispitivanje uzoraka i rezultati .....	19
2.2.1. Jednosmjerni uzorak - $0^{\circ}$ .....	23
2.2.2. Jednosmjerni uzorak - $90^{\circ}$ .....	24
2.2.3. Tkanje – $0/90^{\circ}$ .....	25
2.2.4. Tkanje - $\pm 45^{\circ}$ .....	26
2.2.5. Proizvoljni uzorak .....	28

---

3. NUMERIČKA ANALIZA .....	30
3.1. Proračunski model.....	30
3.2. Rezultati .....	32
3.2.1. Jednosmjerni uzorak – 0° .....	34
3.2.2. Jednosmjerni uzorak – 90° .....	36
3.2.3. Tkanje – 0° .....	38
3.2.4. Tkanje - $\pm 45^\circ$ .....	40
3.2.5. Proizvoljni uzorak .....	42
3.2.6. Usporedba rezultata iz HyperWorks programskog paketa .....	46
4. ZAKLJUČAK.....	47
LITERATURA.....	49

## POPIS SLIKA

Slika 1.	McLaren MP4/1 okvir od ugljičnih vlakana [2].....	1
Slika 2.	Prednja sudarna konstrukcija, ugljikom ojačan kompozit, Mercedes SLR [6] .....	3
Slika 3.	Elementi za stvaranje negativnog uzgona: A) Prednji razdjelnik, B) Bočni kanal, C) Bočna podnica, D) Stražnje krilo [7].....	4
Slika 4.	Vratilo izrađeno od kompozita s ugljičnim vlaknima [8].....	5
Slika 5.	Vidljivi slojevi ugljičnih vlakana [5].....	5
Slika 6.	Kotač od kompozita s ugljičnim vlaknima Koenigsegg Regera [10].....	6
Slika 7.	a) Materijalni koordinatni sustav, b) Postavni kut sloja [11] .....	7
Slika 8.	Vrste tkanja [9]: a) Obično, b) Saten, c) Keper .....	9
Slika 9.	Usporedba krivulja popuštanja za kriterij maksimalnih naprezanja i Tsai-Hill kriterij [13] .....	12
Slika 10.	Usporedba krivulja popuštanja za kriterije popuštanja Tsai-Hill i Tsai-Wu [13] .....	12
Slika 11.	Podtlačno oblikovanje vrećom [18] .....	15
Slika 12.	Autoklav – Rimac Automobili .....	16
Slika 13.	Uzorak od jednosmjernih slojeva kompozita .....	17
Slika 14.	Uzorak sa slojevima tkanja.....	18
Slika 15.	Kidalica MESSPHYSIK BETA .....	19
Slika 16.	Dijagram ovisnosti inženjerskog naprezanja o deformaciji za različite uzorke ....	20
Slika 17.	Dijagram ovisnosti naprezanja o deformaciji za jednosmjerni uzorak - 0° .....	23
Slika 18.	Popušteni uzorak s jednosmjernim slojevima – 0° .....	24
Slika 19.	Dijagram ovisnosti naprezanja o deformaciji, jednosmjerni uzorak – 90° .....	24
Slika 20.	Popušteni uzorak sa jednosmjernim slojevima – 90° .....	25
Slika 21.	Dijagram ovisnosti naprezanja o deformaciji za uzorak s tkanjem - 0/90° .....	25
Slika 22.	Popušteni uzorak od tkanja 0/90° .....	26
Slika 23.	Inženjerski i stvarni dijagram ovisnosti naprezanja o deformaciji uzorka $\pm 45^\circ$ .....	27
Slika 24.	Popušteni uzorak sa slojevima tkanja $\pm 45^\circ$ .....	28
Slika 25.	Dijagram ovisnosti naprezanja o deformaciji za proizvoljni uzorak.....	28
Slika 26.	Popušteni uzorak s različitim slojevima tkanja .....	29
Slika 27.	Ljuskasti konačni element S4R – Abaqus .....	30
Slika 28.	Prikaz korištenih kinematskih veza za definiranje rubnih uvjeta.....	30
Slika 29.	Rubni uvjeti .....	31
Slika 30.	Dijagram konvergencije pomaka točke A .....	33
Slika 31.	Mreže konačnih elemenata za pokazivanje konvergencije: a) 3 KE, b) 600 KE ..	33
Slika 32.	Indeks popuštanja u trenutku popuštanja uzoraka: a) Tsai-Hill, b) Kriterij maksimalnih naprezanja, c) Tsai-Wu .....	34
Slika 33.	Deformirani oblik s konturama pomaka za jednosmjerni uzorak 0° .....	35
Slika 34.	Indeks popuštanja u trenutku popuštanja uzoraka: a) Tsai-Hill, b) Tsai-Wu, c) Kriterij maksimalnih naprezanja .....	36
Slika 35.	Deformirani oblik sa konturama pomaka za jednosmjerni uzorak 90° .....	37

---

Slika 36.	Indeks popuštanja u trenutku popuštanja uzoraka: a) Tsai-Hill, b) Tsai-Wu, c) Kriterij maksimalnih naprezanja .....	38
Slika 37.	Deformirani oblik s konturama pomaka za uzorak s tkanjem $0/90^\circ$ .....	39
Slika 38.	Indeks popuštanja u trenutku popuštanja uzoraka: a) Tsai-Hill, b) Tsai-Wu, c) Kriterij maksimalnih naprezanja .....	40
Slika 39.	Dijagram ovisnosti naprezanja o deformaciji uzorka s tkanjem pod $\pm 45^\circ$ .....	41
Slika 40.	Indeks popuštanja prema Tsai-Hill kriteriju: a) 1. sloj- $0^\circ$ , b) 2. sloj- $45^\circ$ , c) 3. sloj- $0^\circ$ , d) 4. sloj- $45^\circ$ , e) 5. sloj- $0^\circ$ , f) 6. sloj- $45^\circ$ .....	43
Slika 41.	Indeks popuštanja prema Tsai-Wu kriteriju: a) 1. sloj- $0^\circ$ , b) 2. sloj- $45^\circ$ , c) 3. sloj- $0^\circ$ , d) 4. sloj- $45^\circ$ , e) 5. sloj- $0^\circ$ , f) 6. sloj- $45^\circ$ .....	44
Slika 42.	Indeks popuštanja prema kriteriju maksimalnih naprezanja: a) 1. sloj- $0^\circ$ , b) 2. sloj- $45^\circ$ , c) 3. sloj- $0^\circ$ , d) 4. sloj- $45^\circ$ , e) 5. sloj- $0^\circ$ , f) 6. sloj- $45^\circ$ .....	45



---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Karakteristične vrijednosti jednosmjernog sloja kompozita [12].....	8
Tablica 2. Karakteristične vrijednosti tkanja kompozita [12] .....	8
Tablica 3. Podatci o epruvetama .....	14
Tablica 4. Raspored slojeva za proizvoljni uzorak.....	14
Tablica 5. Dimenzije uzorka od jednosmjernih slojeva kompozita [16].....	17
Tablica 6. Dimenzije uzoraka sa slojevima tkanja, u milimetrima .....	18
Tablica 8. Podatci iz ispitivanja jednosmjernog uzorka - 0° .....	23
Tablica 9. Podatci iz ispitivanja jednosmjernog uzorka - 90° .....	24
Tablica 10. Podatci iz ispitivanja uzorka s tkanjem - 0/90° .....	26
Tablica 11. Podatci iz ispitivanja uzorka $\pm 45^\circ$ .....	27
Tablica 12. Podatci iz ispitivanja proizvoljnog uzorka .....	29
Tablica 13. Materijalni podatci za korištene slojeve .....	32
Tablica 14. Usporedba vlačnih čvrstoća numerike i eksperimenta za jednosmjerni uzorak 0° ..	34
Tablica 15. Usporedba vlačnih čvrstoća numerike i eksperimenta jednosmjerni uzorak 90° ..	36
Tablica 16. Usporedba vlačnih čvrstoća numerike i eksperimenta za uzorak od tkanja 0/90° ..	38
Tablica 17. Usporedba vlačnih čvrstoća numerike i eksperimenta .....	40
Tablica 18. Usporedba vlačnih čvrstoća numerike i eksperimenta .....	45
Tablica 19. Vlačne čvrstoće dobivene programskim paketom HyperWorks .....	46

## POPIS OZNAKA

### Latinične oznake

Oznaka	Jedinica	Opis
$b$	mm	Širina uzorka
$\mathbf{C}$	MPa	Tenzor elastičnosti
$E_i$	GPa	Modul elastičnosti u pravcu glavne materijalne osi $i$
$F_L$	N	Lomna sila
$F_i$	GPa <sup>-1</sup>	Parametri čvrstoće korišteni u Tsai-Wu kriteriju
$F_{ij}$	GPa <sup>-2</sup>	Parametri čvrstoće korišteni u Tsai-Wu kriteriju
$G_{12}$	GPa	Modul smicanja u ravnini sloja
$h$	mm	Debljina uzorka
$h_T$	mm	Širina ojačanja
$L$	mm	Duljina uzorka
$L_T$	mm	Duljina ojačanja
$S$	MPa	Smična čvrstoća u ravnini sloja
$X_t$	MPa	Vlačna čvrstoća u pravcu vlakna
$X_{et}$	[-]	Dopuštena vlačna deformacija u pravcu vlakna
$X_c$	MPa	Tlačna čvrstoća u pravcu vlakna
$X_{ec}$	[-]	Dopuštena tlačna deformacija u pravcu vlakna
$Y_t$	MPa	Vlačna čvrstoća u ravnini sloja okomito na pravac vlakna
$Y_{et}$	[-]	Dopuštena vlačna deformacija okomito na pravac vlakna
$Y_c$	MPa	Tlačna čvrstoća u ravnini sloja okomito na pravac vlakna
$Y_{ec}$	[-]	Dopuštena tlačna deformacija okomito na pravac vlakna

### Grčke oznake

Oznaka	Jedinica	Opis
$\gamma$	[-]	Kutna deformacija
$\boldsymbol{\varepsilon}$	[-]	Vektor deformacija
$\varepsilon_0$	%	Inženjerska deformacija
$\varepsilon_x$	[-]	Deformacija u pravcu uzdužne osi epruvete
$\varepsilon_y$	[-]	Deformacija u pravcu okomitom na uzdužnu os epruvete
$\varepsilon_m$	%	Deformacija pri lomu
$\nu_{12}$	[-]	Poissonov koeficijent u ravnini sloja
$\boldsymbol{\sigma}$	MPa	Vektor naprezanja
$\sigma_0$	MPa	Inženjersko naprezanje
$\sigma_m$	MPa	Vlačna čvrstoća
$\tau_{12}$	MPa	Posmično naprezanje u ravnini sloja

---

## SAŽETAK

Tema rada je numeričko modeliranje popuštanja kompozitnih epruveta izrađenih od materijala materijala karakterističnih za automobilske konstrukcije. Riječ je o kompozitnim materijalima ojačanim ugljičnim vlaknima u epoksidnim matricama. Nakon što je dan pregled tehničkih rješenja koja se koriste kod automobilske konstrukcije, te objašnjeni osnovni pojmovi mehanike kompozitnih materijala, opisan je proces izrade ispitnih uzoraka te ispitivanje istih sa svrhom dobivanja realnih podataka o materijalu. Uzorci su izrađeni u tvrtki Rimac Automobili a sama ispitivanja su provedena na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku. Nakon prikaza i analize rezultata ispitivanja, popuštanje epruveta je analizirano metodom konačnih elemenata. Kao ulazni podatci za opisivanje mehaničkih svojstava materijala korišteni su podatci dobiveni eksperimentom. Razmotrena su tri često korištena kriterija popuštanja kompozitnih materijala: kriterij maksimalnih naprezanja, Tsai-Hill kriterij i Tsai-Wu kriterij. Određena je vlačna čvrstoća uzoraka prema svakom od navedenih kriterija, te su uspoređena odstupanja između pojedinih kriterija kao i odstupanja svakog kriterija od eksperimentalnih rezultata.

Ključne riječi: ugljična vlakna, popuštanje kompozita, vlačno ispitivanje kompozita, numerička analiza, simulacija, metoda konačnih elemenata, automobilske konstrukcije.

---

**SUMMARY**

The subject of this thesis is the numerical modelling of composite coupons made of materials applied in automotive structures. More precisely, the considered materials are carbon fiber reinforced polymers. In the preface, the application of composite parts in automotive structures is reviewed and the basic concepts of the mechanics of composite materials are shown. The manufacturing process of composite coupons is described, along with the experimental methods used to obtain realistic material data. The coupons were manufactured in the company Rimac Automobili and were tested on the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, in the Laboratory for experimental mechanics. The results of the tests are shown, analyzed and used as input for the numerical modelling of coupon failure, using the finite element method. Three commonly used failure criteria were applied: the Maximum stress criterion, Tsai-Wu criterion and Tsai-Hill criterion. Coupon tensile strength was determined with each criterion and compared with the experimental data.

Key words: carbon fibers, composite failure, determination of tensile properties, numerical analysis, simulation, finite element method, automotive structures.

## 1. UVOD

Kompozitni materijali su materijali koji se sastoje od dvaju ili više faza različitih mehaničkih svojstava od kojih se svaka može upotrebljavati kao samostalni materijal. Faze su: osnovni materijal (matrica) i dodatni materijal (ojačavalo). Posebnost kompozita je u tome što se kombiniranjem različitih materijala postižu specifične karakteristike i svojstva kakva ne posjeduje niti jedan sastojak sam za sebe.

U posljednje vrijeme upotreba kompozitnih materijala u automobilskoj industriji znatno se povećala. Prema [1], ukupna svjetska potrošnja kompozitnih materijala u automobilskoj industriji se povećala s 42.8 milijuna tona 2006. godine na 68.5 milijuna tona 2011. godine. Bilo da je riječ o visoko serijskoj proizvodnji komercijalnih automobila ili nisko serijskoj proizvodnji sportskih vozila, kompozitni materijali sve se više upotrebljavaju kao zamjena konstrukcijama koje su do sada izrađivane od materijala poput čelika i aluminija.

S povijesnog stajališta, prvi automobil s kompozitnom karoserijom je bio Chevrolet Corvette (ojačanja od staklenih vlakana), javnosti predstavljen u New Yorku 1953. godine. U motornim sportovima poput Formule 1 prevladavaju ugljičnim vlaknima ojačani kompoziti gdje je tim McLaren sa svojim bolidom MP4/1 iz 1981. godine kao prvim bolidom sa okvirom od ugljičnih vlakana (engl. *Monocoque*), prikazanim na slici 1, postavio nove standarde tog natjecanja.



**Slika 1.** McLaren MP4/1 okvir od kompozita s ugljičnim vlaknima [2]

Kompoziti, u odnosu na tradicionalne materijale, imaju razne prednosti poput relativno visoke čvrstoće, niske mase, odlične otpornosti na koroziju te dobra udarna i zamorna ponašanja. Ove prednosti poboljšavaju performanse automobila i vode ka boljoj sigurnosti i manjoj energetskej potrošnji. Prema [1,2], prosječni faktor redukcije goriva za konvencionalni motor s unutarnjim izgaranjem je definiran kao 0.69 l/100 km za svakih 100 kilograma smanjenja mase vozila. Upotreba kompozita s ojačanjima od ugljičnih vlakana umjesto tradicionalnih materijala za karoseriju i šasiju može smanjiti masu vozila za 50%. Važno je naglasiti da se s redukcijom mase automobila smanjuje i emisija ugljikovog dioksida.

Najveći problemi s kojima se suočava automobilska industrija pri primjeni kompozitnih materijala su: visoka cijena u usporedbi s tradicionalnim materijalima (čelik i aluminij), složeni i skupi proizvodni procesi za velikoserijsku proizvodnju te nepoznata mehanička ponašanja određenih vrsta kompozita.

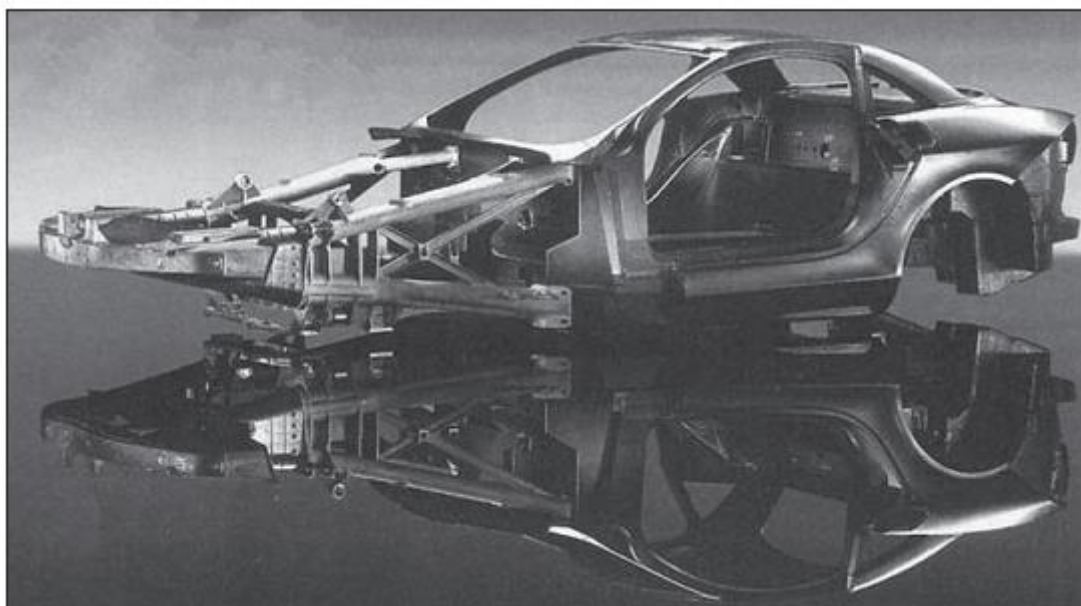
Postoje različite vrste kompozitnih materijala, od kojih se u automobilskej industriji pretežito koriste kompoziti s vlaknastim ojačanjima od ugljičnih ili staklenih vlakana s polimernim matricama. U zadnje vrijeme, sve češće se upotrebljavaju hibridni kompoziti koji u sebi sadrže ojačanja od različitih materijala poput kombinacije ugljikovih i staklenih vlakana [3]

Polimerni kompoziti primjenjivani u automobilskej industriji se, prema [4], mogu podijeliti na:

- **Ne-strukturalne kompozite** – kompoziti od kratkih staklenih vlakana s udjelom ojačanja od 10% do 50% mase, korištenih za papučiće, kućišta zrcala, ukrasne elemente interijera vozila i još mnoge druge komponente
- **Polu-strukturalne kompozite** – kompoziti sa staklenim ili ugljičnim ojačanjima u obliku mata ili kontinuiranih vlakana. Mogu biti jednosmjerni ili u obliku tkanja. Matrice su plastomerne ili duromerne. Koriste se za vanjske dijelove automobila poput haube, vrata, krova i prtljažnika.
- **Strukturalne kompozite** – kompoziti s kontinuiranim ugljičnim vlaknima. Mogu biti jednosmjerni ili u obliku tkanja. Matrice su isključivo duromerne. Koriste se za izradu odbojnika, sudarnih konstrukcija, kotača, elemenata ovjesa, itd.

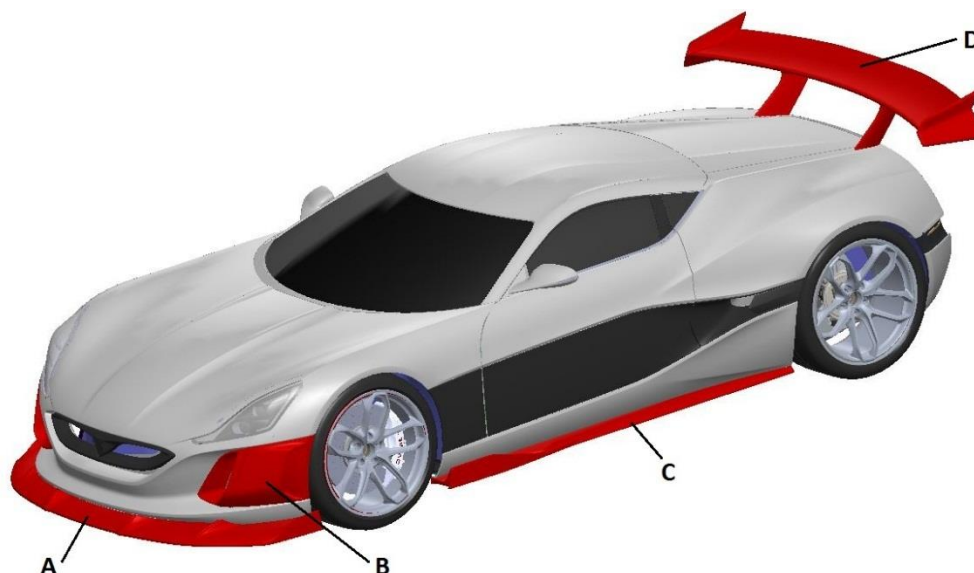
## 1.1. Upotreba kompozitnih konstrukcija u automobilima

U automobilskoj industriji velika važnost se pridaje sigurnosti vozila i putnika pri sudarima. S obzirom da se pomoću kompozitnih materijala može konstruirati lagana konstrukcija koja može podnijeti veće razine oštećenja od iste konstrukcije izrađene od čelika ili aluminija, u zadnje vrijeme se i prednje i stražnje sudarne konstrukcije izrađuju od kompozitnih materijala. Komponente sudarne konstrukcije su najčešće cjevaste konstrukcije različitog broja slojeva s različitim orijentacijama vlakana. Jedna takva konstrukcija prikazana je na slici 2. Važan parametar za ocjenu sudarnih svojstava nekog materijala jest specifična energija apsorpcije koja nam govori koliko energije materijal može apsorbirati po jedinici svoje mase. Prema [5], za apsorpciju energije najbolja se pokazala kombinacija ugljičnih vlakana s epoksidnom matricom, zatim staklena vlakna s polipropilenskom matricom te nakon njih čelik i aluminij.



**Slika 2.** Prednja sudarna konstrukcija, ugljikom ojačan kompozit, Mercedes SLR [6]

Najkorišteniji kompozitni materijal u sportskoj automobilskoj industriji je kontinuiranim ugljičnim vlaknima ojačana epoksidna matrica. Ta kombinacija materijala je preuzeta iz zrakoplovne industrije radi zahtjevnih performansa koje joj se nameću. U klasi sportskih automobila koristi se za izradu elemenata za stvaranje sile negativnog uzgona (engl. *downforce*) koji vozilu omogućavaju ostvarivanje boljih performansi. Ti elementi su prikazani na slici 3. koja prikazuje vozilo Concept One, prvi električni ultra-sportski automobil koji se proizvodi u hrvatskoj tvrtki Rimac Automobili. Na slici su crvenom bojom označeni spomenuti elementi.



**Slika 3. Elementi za stvaranje negativnog uzgona: A) Prednji razdjelnik, B) Bočni kanal, C) Bočna podnica, D) Stražnje krilo [7]**

Zahvaljujući maloj masi i otpornosti na zamor, kompozitni materijali se koriste za izradu vratila i opruga. Prema [8], pokazano je da je torzijska zamorna čvrstoća vratila hibridnog kompozita sastavljenog od ugljičnih i aluminijskih ojačanja veća od zamorne čvrstoće vratila izrađenog isključivo od aluminijskih. Razlog dobre otpornosti na propagaciju pukotina kompozitnih materijala je u tome što su upravo vlakna ta koja sprječavaju daljnje širenje pukotine kroz komponentu. Na slici 4 je prikazano vratilo od ugljičnih vlakana.





**Slika 4. Vrtilo izrađeno od kompozita s ugljičnim vlaknima [8]**

Znatna ušteda na masi se također može ostvariti na težim vozilima zamjenom lisnatih opruga izrađenih od tradicionalnih materijala s kompozitnim lisnatim oprugama. Također je moguća izrada podizača ventila od hibridnih kompozita u motoru s unutarnjim izgaranjem. Prema [4], jedna takva konstrukcija je rezultirala uštedom mase od 35% u odnosu na tradicionalni čelični podizač ventila. Sve više proizvođača sportskih, ali i luksuznih automobila pokušava što više dijelova od tradicionalnih materijala zamijeniti dijelovima načinjenih od ugljičnim vlaknima ojačanih kompozita. S obzirom da se tu često radi o nestrukturalnim dijelovima moguće su izvedbe koje samo za vanjske, tj. vidljive slojeve imaju ugljična vlakna a u unutrašnjosti komponente se koriste razne ispune. Takve komponente prikazane su na slici 5.



**Slika 5. Vidljivi slojevi ugljičnih vlakana [5]**

Jedan od kompliciranijih proizvoda za izradu od kompozitnih materijala je kotač automobila. Izrada kotača od laganog materijala uvelike poboljšava performanse vozila jer je kotač na automobilu neovješena rotirajuća masa i iznimno ju je bitno minimizirati. Osim problema izrade kalupa za dobivanje tako složene geometrije, kod vozila visokih performansi veliki problem je disipacija toplinske energije s kočnih diskova i čeljusti na kotač. Kako bi materijal izdržao visoka toplinska opterećenja potrebno je koristiti posebne aditive u smoli [9]. Na slici 6 prikazan je kotač automobila Koenigsegg Regera



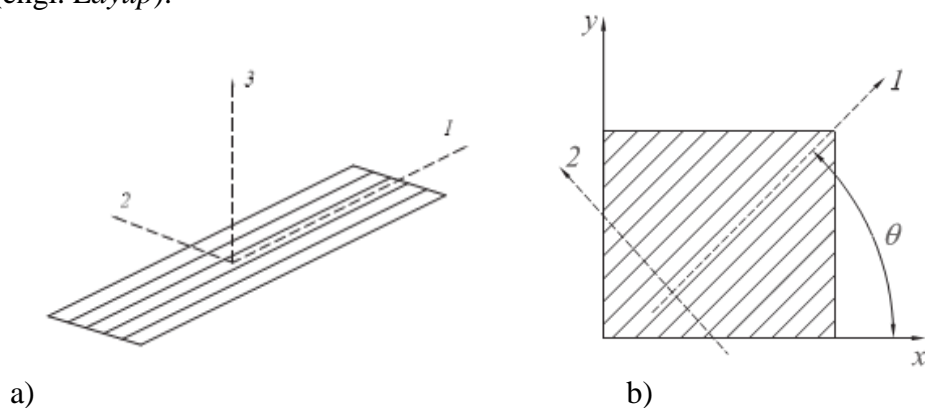
**Slika 6. Kotač od kompozita s ugljičnim vlaknima Koenigsegg Regera [10]**

## 1.2. Osnovni izrazi iz mehanike kompozitnih materijala

U ovom radu razmatraju se kompoziti s kontinuiranim ugljičnim vlaknima povezanim s polimernom matricom (takvi kompoziti se skraćeno nazivaju CFRP engl. *Carbon Fiber Reinforced Polymers*) u slojeve koji su međusobno povezani i tvore višeslojni kompozit – laminat, u ostatku teksta biti će riječ isključivo o takvoj vrsti kompozita.

### 1.2.1. Jednosmjerni slojevi

Jednosmjerni slojevi kompozita (engl. *Unidirectional*) su oni slojevi koji imaju sva vlakna usmjerena u istom smjeru. Smjer, odnosno orijentacija vlakana je definirana kutom između osi 1 lokalnog koordinatnog sustava, koji se naziva materijalni koordinatni sustav, i osi x globalnog koordinatnog sustava cijelog laminata. Kut je prikazan na slici 7b) i naziva se postavni kut sloja. Os 1 je uvijek u smjeru vlakana, os 2 je okomita na smjer vlakana, a os 3 je okomita na ravninu koju razapinju osi 1 i 2 kako je prikazano na slici 7a). Način slaganja slojeva kompozita, kojim je definiran redoslijed slaganja slojeva i orijentacija vlakana svakog sloja, naziva se raspored slojeva (engl. *Layup*).



Slika 7. a) Materijalni koordinatni sustav, b) Postavni kut sloja [11]

Vlaknima ojačani kompoziti općenito spadaju u skupinu ortotropnih materijala koji posjeduju tri ravnine elastične simetrije. To znači da u konstitutivnoj jednadžbi

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}\boldsymbol{\varepsilon}, \quad (1.1)$$

gdje je  $\boldsymbol{\sigma}$  – vektor naprezanja,  $\mathbf{C}$  – matrica elastičnosti,  $\boldsymbol{\varepsilon}$  – vektor deformacija, tenzor elastičnost  $\mathbf{C}$  ima 9 nezavisnih materijalnih komponenta:  $E_1, E_2, E_3, \nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}, G_{12}, G_{13}$  i  $G_{23}$ . Indeksi označavaju materijalnu os na koju se pojedina komponenta odnosi.

Ako se uvede pretpostavka o ravninskom stanju naprezanja koje vlada u jednom sloju kompozita (debljina jednog sloja obično je između 0.1 i 0.5 mm) tenzor elastičnosti se reducira na 4 nezavisne materijalne komponente:  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $\nu_{12}$ ,  $G_{12}$ . To znači da za dobivanje veze između deformacija i naprezanja ovakvog materijala, potrebno je poznavati 4 materijalna parametara. Za jednosmjerni kompozit s ugljičnim vlaknima i epoksidnom matricom karakteristične vrijednosti su prikazane u tablici 1.

**Tablica 1. Karakteristične vrijednosti jednosmjernog sloja kompozita [12]**

$E_1$	$E_2$	$\nu_{12}$	$G_{12}$
150 GPa	12 GPa	0.25	5 GPa

Iz tablice 1. vidimo da ovakav materijal ima mnogo veću krutost u smjeru vlakana nego u smjeru okomitom na vlakna. Razlog leži u tome da u smjeru osi 1 dominiraju mehanička svojstva ugljičnih vlakana koja su višestruko bolja od mehaničkih svojstava epoksidne matrice koja dominiraju u smjeru osi 2.

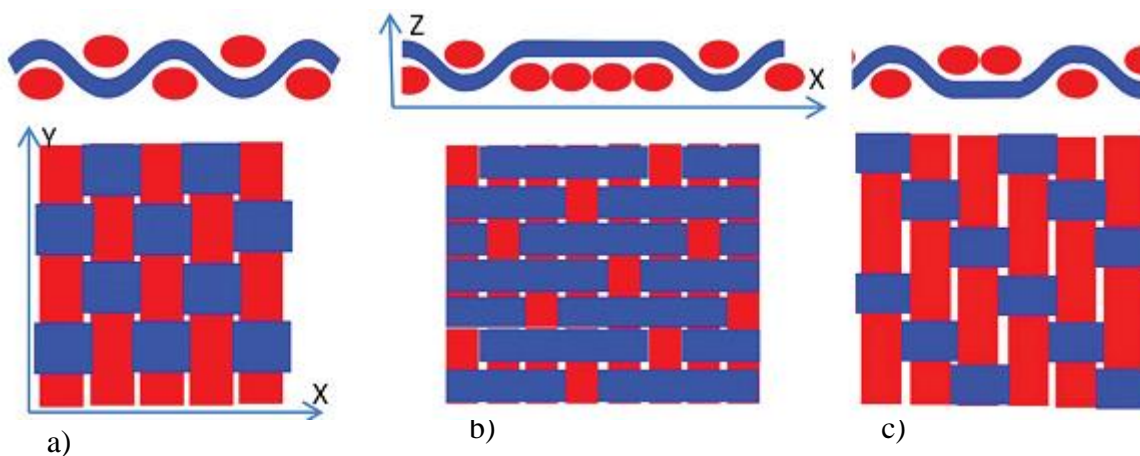
### 1.2.2. Tkanja

Češće od jednosmjernih kompozita u automobilskoj industriji se primjenjuju tkanja. Riječ je o sloju međusobno isprepletenih vlakana s ciljem dobivanja ujednačenijih svojstava u različitim smjerovima materijala. Premda ovakvi slojevi imaju lošija mehanička svojstva u smjeru vlakana od jednosmjernih slojeva, često se upotrebljavaju u realnim konstrukcijama. Prednosti tkanja nad jednosmjernim slojevima su bolja svojstva pri složenim stanjima naprezanja i u uvjetima popuštanja, te bolje mogućnosti strojne obrade uzoraka. Također valja primijetiti da se za vidljive slojeve preferiraju tkanja radi specifičnog izgleda. Karakteristične vrijednosti za ovakav materijal prikazane su u tablici 2.

**Tablica 2. Karakteristične vrijednosti tkanja kompozita [12]**

$E_1$	$E_2$	$\nu_{12}$	$G_{12}$
66 GPa	66 GPa	0.04	4.1 GPa

Neka od najčešće korištenih vrsta tkanja prema [9] su prikazana na slici 8.



Slika 8. Vrste tkanja [9]: a) Obično, b) Saten, c) Keper

Obično tkanje (engl. *Plain weave*) u kojem poprečna vlakna naizmjenice prolaze ispod i iznad uzdužnih vlakana je jedno od najčešće korištenih tkanja uz keper tkanje (engl. *Twill weave*) u kojem jedno ili više poprečnih vlakana naizmjenice prolaze ispod ili iznad jednog ili više uzdužnih vlakana. Valja napomenuti da su ova dva tkanja najzastupljenija u strukturalnim dijelovima. Prema [9], obično tkanje pokazuje veću čvrstoću od keper tkanja pri vlačnom opterećenju. Rezultati su obrnuti pri savojnim opterećenjima gdje keper tkanje pokazuje bolju savojnu čvrstoću. Keper tkanje se također često primjenjuje na vanjskim slojevima komponenata radi estetski poželjnog dojma dijagonale koji se vidi na slici 8c) .

### **1.2.3. Kriteriji popuštanja kompozitnih materijala**

Kod kompozitnih materijala mehanizmi popuštanja su bitno drugačiji nego kod izotropnih materijala (tehničkih metala) te se ne mogu opisati klasičnim pristupom kao krhki ili duktilni lom. Razlog tome je što se konstrukcije od kompozitnih materijala sastoje od velikog broja slojeva koji nisu homogeni već se sastoje od barem dva konstituenta. Danas postoji vrlo veliki broj kriterija popuštanja ovakvih materijala od kojih su u inženjerskoj praksi najširi [11]:

- kriterij maksimalnih naprezanja,
- kriterij maksimalnih deformacija,
- Tsai-Wu kriterij,
- Tsai-Hill kriterij,
- Hashin-ov kriterij.

Kriteriji popuštanja se uvijek postavljaju za jedan sloj materijala. Naprezanja su definirana u materijalnom sustavu te je nužno poznavati 5 parametara čvrstoće:

- $X_t$  - vlačna čvrstoća u pravcu vlakna,
- $X_c$  - tlačna čvrstoća u pravcu vlakna,
- $Y_t$  - vlačna čvrstoća okomito na pravac vlakna,
- $Y_c$  - tlačna čvrstoća okomito na pravac vlakna,
- $S$  – smična čvrstoća.

Slijedi kratki opis kriterija popuštanja korištenih u ovom radu. Svi kriteriji su dani za slučaj ravninskog stanja naprezanja premda se svi od njih u proširenom obliku mogu koristiti i za troosne slučajeve naprezanja.

### 1.2.3.1. Kriterij maksimalnih naprezanja

Ovaj kriterij se pretežito primjenjuje kod jednoosnog opterećenja i prema njemu do popuštanja neće doći ako je ispunjeno:

$$\text{za } \sigma > 0 \quad \left\{ \begin{array}{l} \sigma_1 < X_t \\ \sigma_2 < Y_t \\ |\tau_{12}| < S \end{array} \right\}, \quad (1.2)$$

$$\text{za } \sigma < 0 \quad \left\{ \begin{array}{l} \sigma_1 > -X_t \\ \sigma_2 > -Y_t \\ |\tau_{12}| < S \end{array} \right\}, \quad (1.3)$$

gdje su  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  i  $\tau_{12}$  naprezanja u smjeru vlakana, okomito na vlakna i smično naprezanje u ravnini sloja.

Nedostatak ovog kriterija je što ne daje pouzdane rezultate za dvoosne slučaje opterećenja. Najtočniji rezultati se dobivaju u slučajevima kada opterećenje djeluje u smjeru vlakana ili okomito na njih.

### 1.2.3.2. Tsai – Hill kriterij

Ovaj kriterij spada u skupinu energetskih kriterija popuštanja. Do popuštanja sloja kompozita neće doći ako je ispunjen uvjet:

$$\frac{\sigma_1^2}{X^2} - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} < 1, \quad (1.4)$$

gdje su parametri  $X, Y$  parametri čvrstoće materijala ovisno o predznaku naprezanja.

### 1.2.3.3. Tsai – Wu kriterij

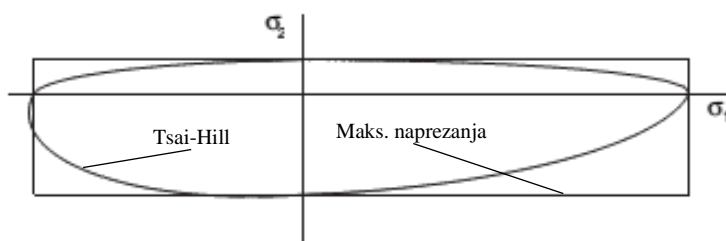
Ovaj kriterij se još naziva i tenzorski ili kvadratični kriterij popuštanja i spada u najčešće korištene kriterije popuštanja. Do popuštanja sloja neće doći ako je:

$$F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\sigma_6^2 - \sqrt{F_{11}F_{22}}\sigma_1\sigma_2 < 1, \quad (1.5)$$

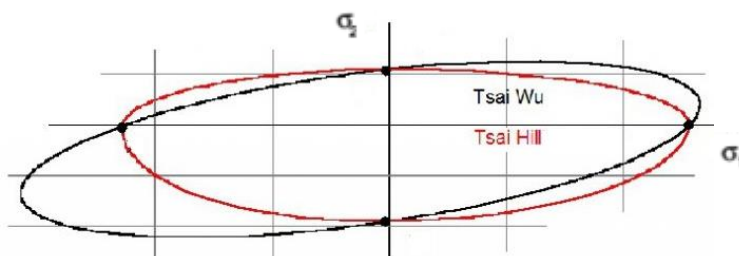
gdje su  $F_1, F_2, F_{11}, F_{22}$  i  $F_{66}$  parametri čvrstoće kompozita.

Ni jedan od opisanih kriterija ne indicira način na koji će kompozit popustiti već samo daje informaciju pri kojem naprezanju određeni sloj popušta. Tsai-Hill i Tsai-Wu kriteriji spadaju u interakcijske kriterije popuštanja radi toga što u obzir uzimaju međudjelovanja pojedinih komponenata naprezanja.

Na slikama 9 i 10 prikazane su krivulje popuštanja u ravnini  $\sigma_1 - \sigma_2$  ( $\tau_{12} = 0$ ). Slika 9 prikazuje usporedbu kriterija najvećih naprezanja s Tsai-Hill kriterijem, a slika 10 prikazuje usporedbu Tsai-Hill i Tsai-Wu kriterija.



**Slika 9. Usporedba krivulja popuštanja za kriterij maksimalnih naprezanja i Tsai-Hill kriterij [13]**



**Slika 10. Usporedba krivulja popuštanja za kriterije popuštanja Tsai-Hill i Tsai-Wu [13]**



### 1.3. Cilj rada

Cilj ovog rada je numeričkim proračunom odrediti vlačnu čvrstoću različitih epruveta kompozitnog materijala ojačanog ugljičnim vlaknima s različitim rasporedom slojeva. Vlačna čvrstoća će se dobiti kao omjer sile loma i početne površine presjeka epruvete. Mehanička svojstva kao i iznos sile pri kojoj dolazi do loma epruvete će se dobiti statičkim vlačnim eksperimentom. S obzirom da nije bilo moguće napraviti tlačni eksperiment radi veoma tankih uzoraka koji bi u klasičnom tlačnom testu bili preosjetljivi na izvijanje, potrebni podaci koji se inače dobivaju iz tog testa su uzeti od proizvođača materijala ili iz literature.

Kako bi dobili potrebna materijalna mehanička svojstva potrebno je napraviti i ispitati epruvete s određenim smjerovima vlakana i rasporedom slojeva. Epruvete i ispitivanja su napravljena po uputama iz normi za vlačno ispitivanje kompozitnih materijala [14],[15],[16] i [17]. Epruvete su napravljene u tvrtki Rimac Automobili a ispitane na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku.

Numeričkom simulacijom vlačnog eksperimenta u programu Abaqus, koristeći podatke o materijalu dobivene iz eksperimenta, odrediti će se lomna sila odnosno prekidna vlačna čvrstoća svake epruvete. Usporediti će se rezultati različitih kriterija popuštanja kako bi se odredilo koji najtočnije opisuje stvarno popuštanje epruvete.

## 2. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA

U sklopu ovog rada izrađeno je i ispitano 5 različitih vrsta epruveta, po 6 uzoraka svake vrste koje su napravljene u tvrtki Rimac Automobili.

Dvije vrste epruveta su napravljene od jednosmjernih slojeva ugljičnih vlakana, u jednoj epruveti su svi slojevi orijentirani pod 0 stupnjeva, odnosno vlakna su usmjerena u smjeru uzdužne osi epruvete. U drugoj su svi slojevi pod 90 stupnjeva, odnosno vlakna su usmjerena okomito na uzdužnu os epruvete.

Dvije vrste epruveta su napravljene od slojeva tkanja, u jednoj su svi slojevi pod 0/90° stupnjeva a u drugoj pod  $\pm 45$  stupnjeva. U tablici 3 su navedeni: debljina jednog sloja svakog uzorka, broj slojeva u jednom uzorku i debljina uzorka.

**Tablica 3. Podatci o epruvetama**

	Vrsta uzorka			
	Jednosmjerni-0°	Jednosmjerni-90°	Tkanje 0/90°	Tkanje $\pm 45^\circ$
Debljina jednog sloja	0,3-0,35	0,3-0,35	0,4-0,45	0,4-0,45
Broj slojeva	3	6	5	5
Debljina epruvete, mm	$1 \pm 0,2$	$2 \pm 0,2$	$2 \pm 0,2$	$2 \pm 0,2$

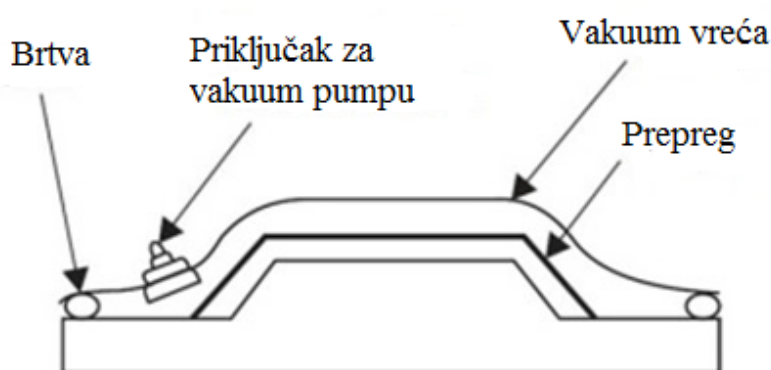
Zadnja vrsta epruveta je također napravljena od slojeva tkanja no slojevi se međusobno razlikuju i po debljini i po smjeru vlakana. Raspored slojeva za ovu epruvetu prikazan je u tablici 4. U daljnjem tekstu ovaj uzorak će se nazivati proizvoljni uzorak.

**Tablica 4. Raspored slojeva za proizvoljni uzorak**

Broj sloja	Orijentacija	Debljina, mm
1.	0/90°	0,3-0,35
2.	$\pm 45^\circ$	0,4-0,45
3.	0/90°	0,4-0,45
4.	$\pm 45^\circ$	0,4-0,45
5.	0/90°	0,4-0,45
6.	$\pm 45^\circ$	0,4-0,45

## 2.1. Produkcija uzoraka

Sve epruvete su izrađene od slojeva ugljičnih vlakana u epoksidnoj matrici u obliku preprega (eng. *Preimpregnated*). Preprezi su slojevi koji su već natopljeni smolom što znači da nakon procesa ručnog laminiranja nije potrebno dodavati smolu. Slojevi preprega se u odgovarajućem broju i usmjerenju polažu na kalup u obliku ravne ploče. S gornje strane kalupa se lijepi vakuum vreća i pomoću vakuum pumpe se uklanja zrak iz kalupa i stvara podtlak kojim se poboljšava spajanje elemenata kompozita. Ovaj postupak se naziva podtlačno oblikovanje vrećom [18] (eng. *Vacuum bagging*) i prikazan je na slici 11.



Slika 11. Podtlačno oblikovanje vrećom [18]

Nakon toga kompozit se stavlja u autoklav koji je prikazan na slici 12. Unutar autoklava kompozit se 90 minuta drži na temperaturi između  $120^{\circ}\text{C}$  i  $160^{\circ}\text{C}$  te na tlaku od 2 do 3 bara. Pri tim uvjetima dolazi do očvršćivanja kompozita i do formiranja njegovih konačnih mehaničkih svojstava.

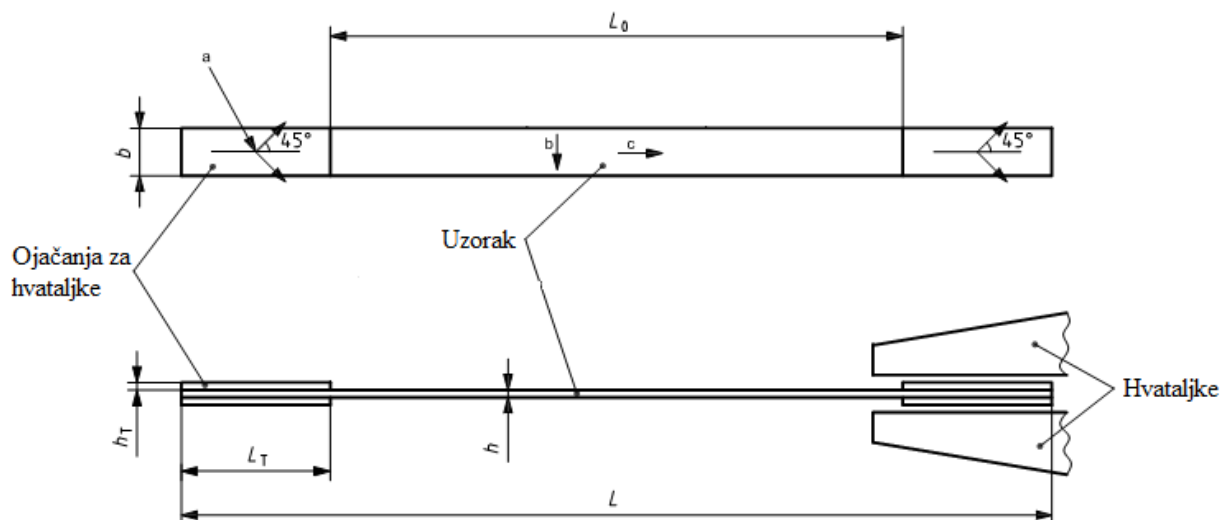
Kako hvataljke kidalice ne bi oštetile ugljična vlakna tijekom ispitivanja i time smanjile čvrstoću uzorka, na svim epruvetama su napravljena ojačanja od staklenog tkanja s vlaknima pod  $\pm 45^{\circ}$  kako je prikazano na slici 13.



**Slika 12. Autoklav – Rimac Automobili**

### ***2.1.1. Epruvete od jednosmjernih slojeva***

Iz ove skupine uzoraka napravljene su dvije vrste: epruvete s vlaknima u smjeru uzdužne osi epruvete i epruvete s vlaknima u poprečnom smjeru. Prema normi za vlačno ispitivanje kompozitnih materijala s jednosmjernim slojevima ojačanja [16] postoje dva različita tipa epruveta. Tip A se odnosi na epruvetu s vlaknima u smjeru uzdužne osi uzorka a tip B na epruvetu s vlaknima u poprečnom smjeru. Epruvete su prikazane na slici 13. Smjerovi vlakana su označeni oznakama: a – smjer vlakana slojeva ojačanja za hvataljke, b – smjer vlakana za tip B, c – smjer vlakana za tip A.



**Slika 13. Uzorak od jednosmjernih slojeva kompozita**

U tablici 3 su prikazane dimenzije epruveta. Sve dimenzije su u milimetrima. Razlog različitim dimenzijama epruveta su bitno različita svojstva svakog tipa epruvete. S obzirom da su vlakna kod tipa A usmjerena u pravcu djelovanja opterećenja za očekivati je da će iznos sile kidalice pri kojoj dolazi do loma epruvete biti značajno veći od istog kod tipa B. Kako ne bi nadmašili najveću silu koju kidalica može ostvariti, potrebno je smanjiti površinu presjeka uzorka.

**Tablica 5. Dimenzije uzorka od jednosmjernih slojeva kompozita [16]**

	Tip A	Tip B
$h$	$1 \pm 0,2$	$2 \pm 0,2$
$b$	$15 \pm 0,5$	$25 \pm 0,5$
$L$	250	250
$L_0$	$150 \pm 1$	$150 \pm 1$
$h_T$	0,5 do 2	0,5 do 2
$L_T$	>50	>50

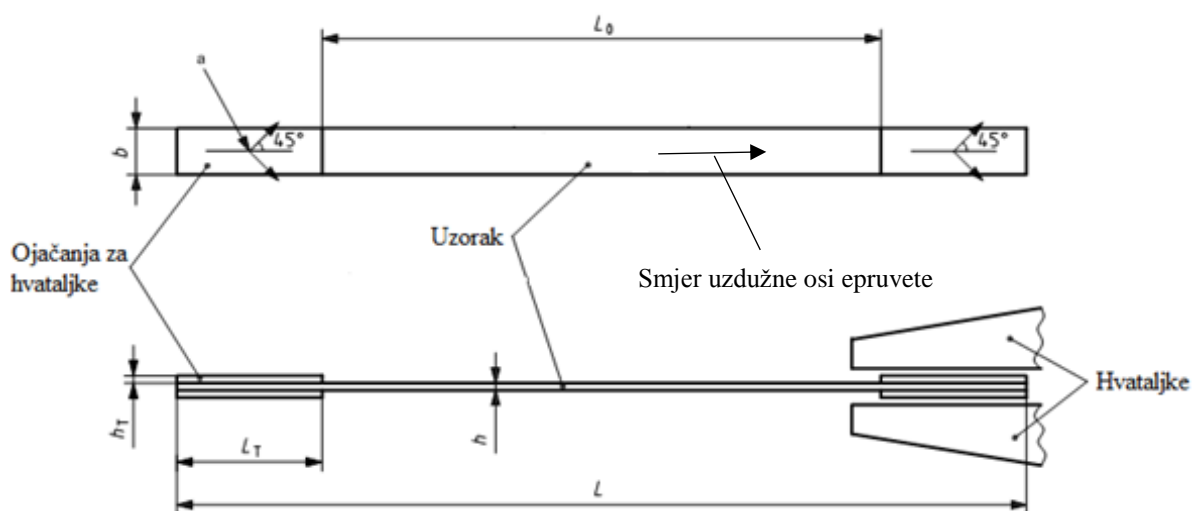
Prepreg od kojeg su napravljene epruvete je ojačan s T300 ugljičnim vlaknima. Udio epoksidne smole u masi iznosi 38% a masa preprega je 300 grama po kvadratnome metru materijala. Kako bi dobili potrebne debljine uzoraka, tip A je napravljen od 3 sloja a tip B od 6 slojeva preprega.

### 2.1.2. Epruvete od tkanja

Sve epruvete u ovoj skupini su napravljene od slojeva tkanja. Napravljene su tri vrste epruveta:

- vlakna pod  $0/90^\circ$  u odnosu na uzdužnu os epruvete,
- vlakna pod  $\pm 45^\circ$  u odnosu na uzdužnu os epruvete,
- proizvoljni uzorak sa kombinacijom slojeva tkanja pod  $0/90^\circ$  i pod  $\pm 45^\circ$ .

Dimenzije uzoraka s tkanjima u milimetrima su prikazani na slici 14, i u tablici 4.



Slika 14. Uzorak sa slojevima tkanja

Tablica 6. Dimenzije uzoraka sa slojevima tkanja, u milimetrima [15]

$h$	$2 \pm 0,2$
$b$	$25 \pm 0,5$
$L$	250
$L_0$	$150 \pm 1$
$h_T$	0,5 do 3
$L_T$	>50

Prepreg od kojeg su izrađene ove epruvete je tzv. keper tkanje, oznaka vlakana je T300. Udio epoksidne smole iznosi 42%, a masa preprega je 415 grama po kvadratnom metru.

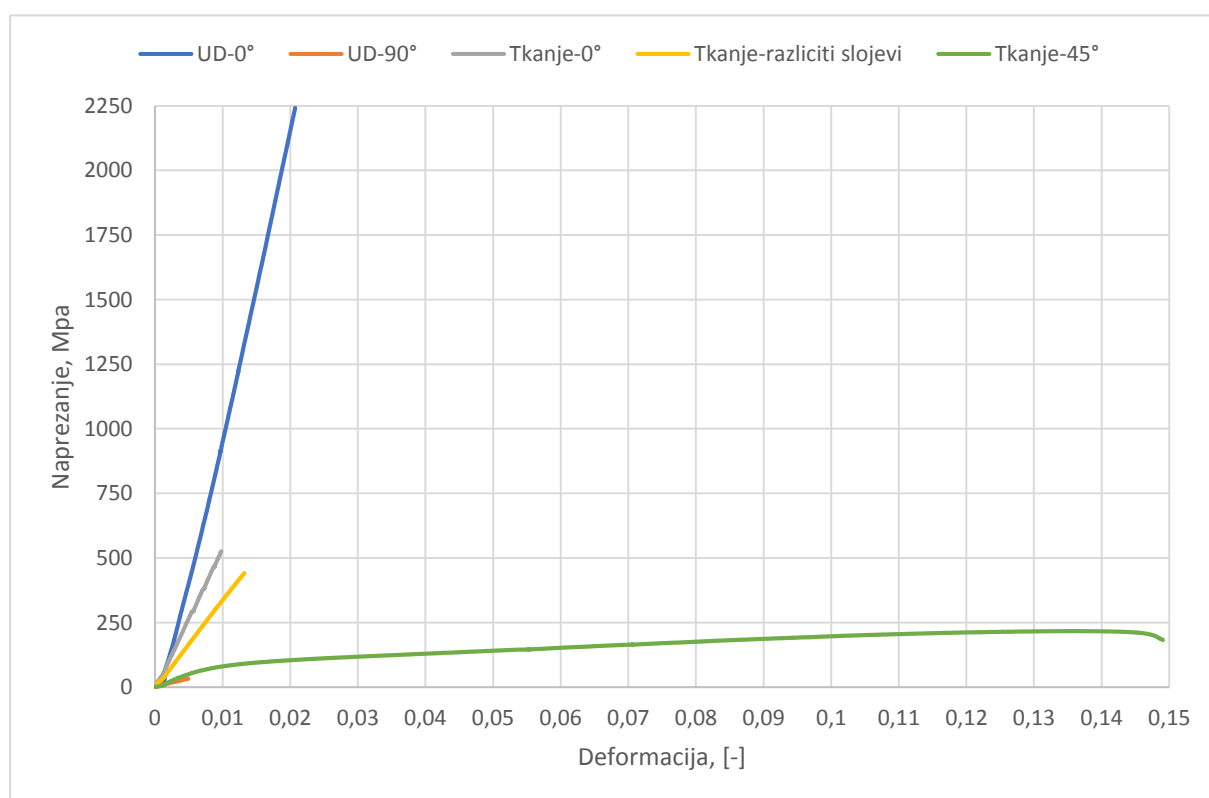
## 2.2. Ispitivanje uzoraka i rezultati

Ispitivanje je provedeno na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku. Vlačni statički testovi provedeni su na kidalici MESSPHYSIK BETA 50-5 kapaciteta 50 kN koja je prikazana na slici 15. Ispitivanja su provedena pri sobnoj temperaturi. Brzina ispitivanja je 2 mm/min.



Slika 15. Kidalica MESSPHYSIK BETA

Dijagram ovisnosti inženjerskog naprezanja o deformaciji za po jedan uzorak iz svake skupine prikazan je na slici 16. Valja napomenuti da to nisu uprosječene vrijednosti; njih će se dobiti statističkom obradom podataka ispitivanja za svaku skupinu uzoraka posebno. Rezultati su prikazani na zajedničkom mjerilu kako bi se bolje vizualizirale razlike između ponašanja pojedinih uzoraka ovisno o vrsti i orijentaciji slojeva. Iz dijagrama su vidljiva iznimno visoke mehanička svojstva uzoraka napravljenih od jednosmjernih vlakana pod  $0^\circ$  (UD- $0^\circ$ ), odnosno u smjeru djelovanja opterećenja, te vrlo niska mehanička svojstva uzoraka od jednosmjernih vlakana pod  $90^\circ$  (UD- $90^\circ$ ). Također je zanimljivo uočiti da se svi uzorci ponašaju potpuno linearno, osim uzorka tkanja pod  $\pm 45^\circ$  kod kojeg je prisutna pojava tzv. pseudo-plastičnosti [19].



**Slika 16. Dijagram ovisnosti inženjerskog naprezanja o deformaciji za različite uzorke**

Vlačni testovi uzoraka s vlaknima u smjeru opterećenja i okomito na njega nam služe za dobivanje parametara  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $X_t$  i  $Y_t$ . Test s vlaknima pod  $\pm 45^\circ$  nam je potreban da dobijemo parametre  $\nu_{12}$ ,  $G_{12}$  i  $S$ .



Za svaku skupinu epruveta potrebno je izračunati uprosječene materijalne parametre na način opisan u normama.

Modul elastičnosti se prema [14] dobiva iz izraza:

$$E = \frac{\sigma'' - \sigma'}{\varepsilon'' - \varepsilon'} \quad (2.1)$$

gdje su:  $\varepsilon'' = 0,0025$ ,  $\varepsilon' = 0,0005$ ,  $\sigma''$  - naprezanje pri deformaciji  $\varepsilon''$  i  $\sigma'$  - naprezanje pri deformaciji  $\varepsilon'$ . Naprezanje (inženjersko) iznosi:

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad (2.2)$$

gdje je:  $F$  – izmjerena vlačna sila kidalice,  $A$  – početna površina presjeka epruvete.

Kako bi se smanjio utjecaj odstupanja dimenzija uzoraka na rezultate naprezanja, za svaki su uzorak debljina i širina izmjerene na 3 različita presjeka po duljini uzorka i zatim je uzeta aritmetička sredina dimenzija iz koje se računa početna površina i naprezanje. Vlačna prekidna čvrstoća je definirana kao najveće postignuto naprezanje tijekom ispitivanja uzorka.

Smično naprezanje se određuje iz ispitivanja s vlaknima pod  $\pm 45^\circ$  i računa prema [17] :

$$\tau_{12} = \frac{F}{2bh}, \quad (2.3)$$

gdje je:  $F$  – izmjerena vlačna sila kidalice,  $b$  – širina uzorka,  $h$  - debljina uzorka.

Da bi izračunali smičnu čvrstoću potrebno je upotrijebiti sljedeći izraz:

$$S = \frac{F_{\text{maks}}}{2bh}, \quad (2.4)$$

gdje je  $F_{\text{maks}}$  – sila pri pucanju epruvete, ili sila pri posmičnoj deformaciji  $\gamma_{12} = 0,05$  ako u tom trenutku još nije došlo do pucanja epruvete.

Posmična deformacija je definirana izrazom:

$$\gamma_{12} = \varepsilon_x - \varepsilon_y, \quad (2.5)$$

gdje je  $\varepsilon_x$  – deformacija u smjeru uzdužne osi uzorka,  $\varepsilon_y$  – deformacija u smjeru okomitom na uzdužnu os uzorka.

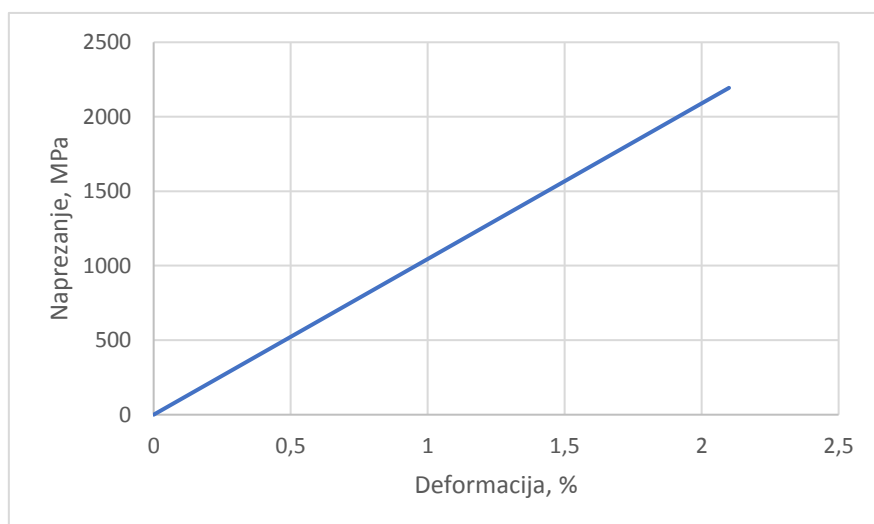
Modul smičnosti se dobiva iz sljedećeg izraza:

$$G_{12} = \frac{\tau_{12}'' - \tau_{12}'}{\gamma_{12}'' - \gamma_{12}'}, \quad (2.6)$$

gdje je  $\tau_{12}''$  - smično naprezanje pri smičnoj deformaciji  $\gamma_{12}' = 0,005$ , a  $\tau_{12}'$  - smično naprezanje pri smičnoj deformaciji  $\gamma_{12}' = 0,001$ .

### 2.2.1. Jednosmjerni uzorak - 0°

Jednosmjerni uzorci s vlaknima u smjeru djelovanja opterećenja pokazuju visoku čvrstoću i krutost. Dijagram ovisnosti naprezanja o deformaciji prikazan je na slici 17.



**Slika 17. Dijagram ovisnosti naprezanja o deformaciji za jednosmjerni uzorak - 0°**

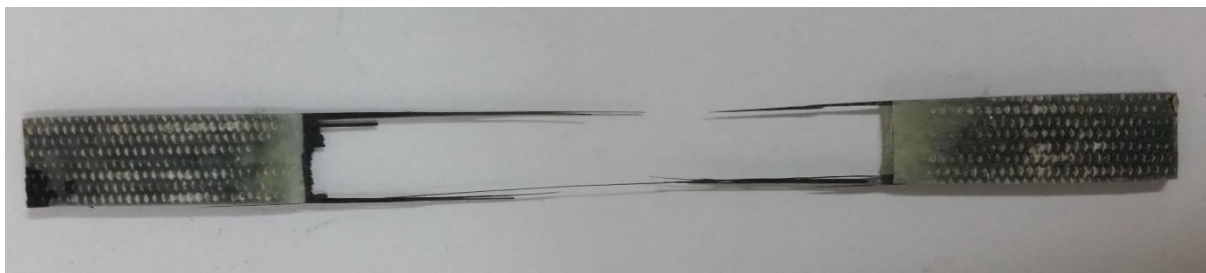
U tablici 6 prikazani su: lomna sila, modul elastičnosti u smjeru vlakana, vlačna čvrstoća i maksimalna deformacija.

**Tablica 7. Podatci iz ispitivanja jednosmjernog uzorka - 0°**

$F_L$ , N	$E_1$ , GPa	$X_t$ , MPa	$X_{Et}$ , %
35274	122	2171	2,13

Također je zanimljiv način na koji ovi uzorci pucaju. Naime, nije došlo do popuštanja samo na jednom presjeku epruvete po duljini već se cijeli materijal između hvataljki rasprsnuo uslijed naglog otpuštanja velike količine akumulirane energije. Izgled epruvete nakon loma je prikazan na slici 18. Može se primijetiti da je prikazana epruveta, kao i sve epruvete ove skupine, popustila radi koncentracije naprezanja na rubovima ojačanja za hvataljke što sugerira da bi vlačna čvrstoća uzoraka materijala bez koncentracija naprezanja mogla biti još i veća. Kako bi

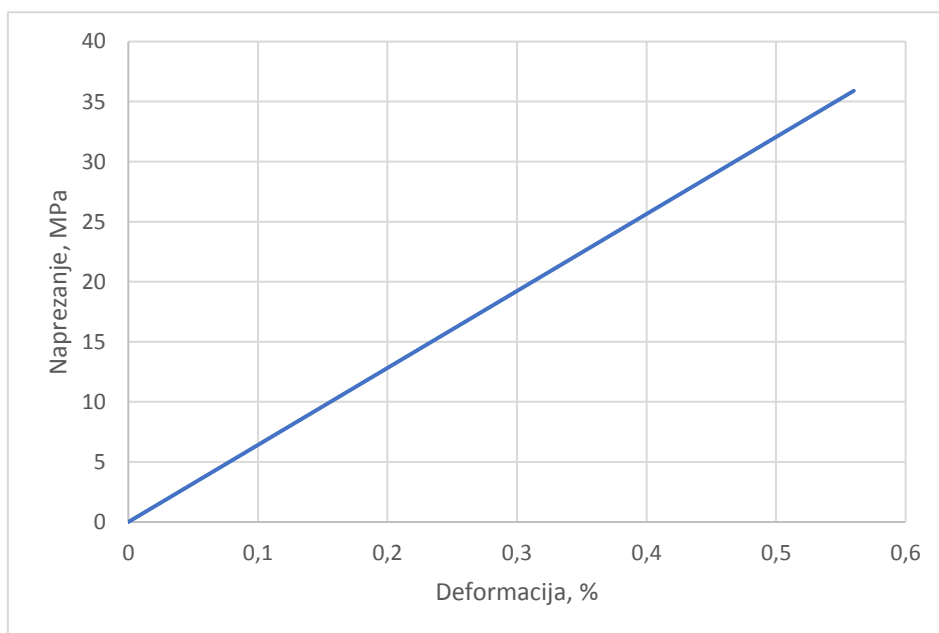
se smanjila osjetljivost ovakvih uzoraka na koncentraciju naprezanja kod ojačanja, poželjno bi bilo napraviti epruvete s radijusima zakrivljenosti.



Slika 18. Popušteni uzorak s jednosmjernim slojevima –  $0^\circ$

### 2.2.2. Jednosmjerni uzorak - $90^\circ$

Uzorci s vlaknima okomitim na smjer opterećenja pokazuju najslabija mehanička svojstva koja su prikazana u tablici 7. Dijagram ovisnosti naprezanja o deformaciji je prikazan na slici 19.

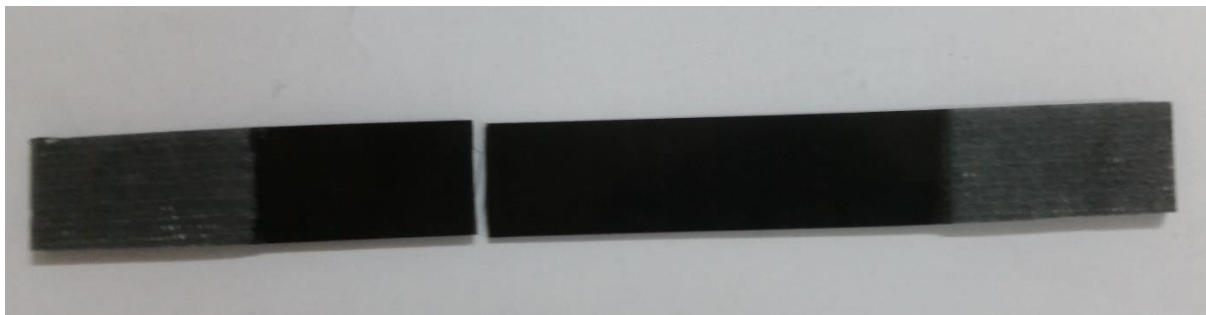


Slika 19. Dijagram ovisnosti naprezanja o deformaciji, jednosmjerni uzorak –  $90^\circ$

Tablica 8. Podatci iz ispitivanja jednosmjernog uzorka -  $90^\circ$

$F_L$ , N	$E_2$ , GPa	$Y_t$ , MPa	$Y_{et}$ , %
2034	6,3	35,9	0,56

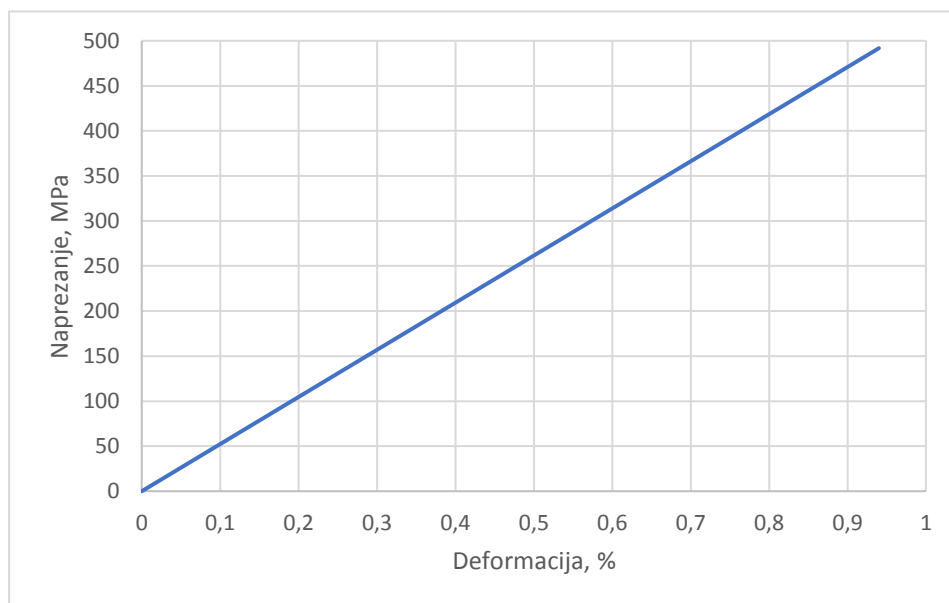
Iz ovih rezultata jasno je da veliku pažnju treba obratiti na smjer djelovanja opterećenja i naprezanja u konstrukcijskom dijelu napravljenom od jednosmjernih kompozita kako bi ostvarili potrebna mehanička svojstva. Popuštena epruveta je prikazana na slici 20.



**Slika 20. Popušteni uzorak sa jednosmjernim slojevima –  $90^\circ$**

### 2.2.3. Tkanje – $0/90^\circ$

Uzorci s tkanjima s vlaknima usmjerenim pod  $0^\circ$  i  $90^\circ$  pokazuju jednako dobra mehanička svojstva u smjeru djelovanja opterećenja i okomito na njega. Često nalaze primjenu raznim granama automobilske industrije zbog toga što kod ovakvih slojeva ne postoji smjer u kojem materijal ima bitno lošija mehanička svojstva. Dijagram ovisnosti naprezanja o deformaciji prikazan je na slici 21, a u tablici 8 su prikazani uprosječeni podaci iz testiranja.

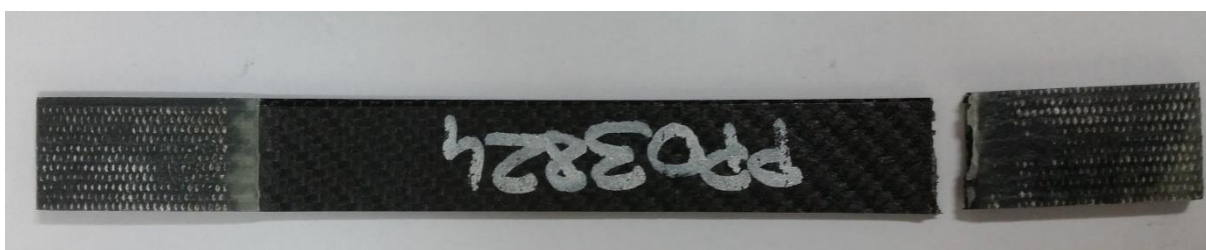


**Slika 21. Dijagram ovisnosti naprezanja o deformaciji za uzorak s tkanjem -  $0/90^\circ$**

**Tablica 9. Podatci iz ispitivanja uzorka s tkanjem - 0/90°**

$E_1$ , GPa	$E_2$ , GPa	$F_{max}$ , N	$X_t = Y_t$ , MPa	$X_{et} = Y_{et}$ , %
69	69	29857	491,8	0,94

Valja napomenuti da su svi uzorci iz ove skupine popustili u čeljustima kidaice radi koncentracija naprezanja, kako je prikazano na slici 22. Iz toga se da zaključiti da je realna vlačna čvrstoća ovog materijala veća od one dobivene ispitivanjem.

**Slika 22. Popušteni uzorak od tkanja 0/90°**

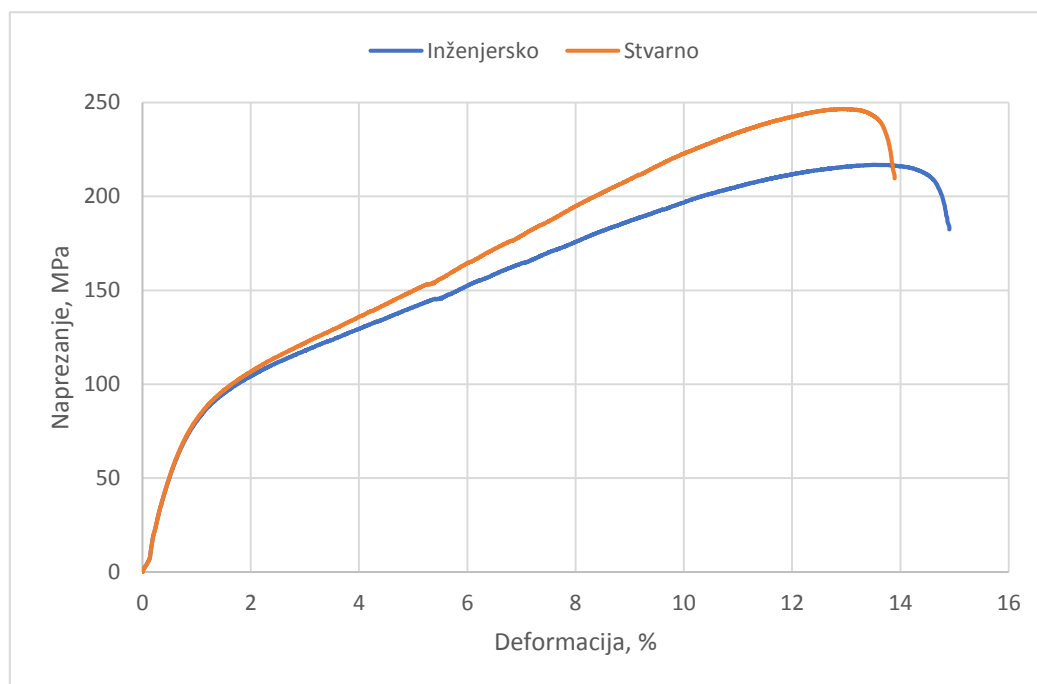
#### 2.2.4. Tkanje - $\pm 45^\circ$

S obzirom da ovi uzorci pri ispitivanju ulaze u nelinearno područje prije računanja potrebnih materijalnih parametara potrebno je dijagrame inženjerskog naprezanja i deformacija pretvoriti u stvarno naprezanje i deformaciju. Prema [20], to se može napraviti pomoću sljedećih izraza:

$$\varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_0), \quad \sigma = \sigma_0(1 + \varepsilon), \quad (2.7)$$

gdje su:  $\varepsilon$  – prirodna ili logaritamska deformacija,  $\varepsilon_0$  – inženjerska ili konvencionalna deformacija,  $\sigma$  – stvarno naprezanje,  $\sigma_0$  – inženjersko ili konvencionalno naprezanje.

Na slici 23 su prikazani dijagrami stvarnog i inženjerskog naprezanja.



**Slika 23. Inženjerski i stvarni dijagram ovisnosti naprezanja o deformaciji uzorka  $\pm 45^\circ$**

Koristeći izraze (2.3) do (2.6) mogu se dobiti iznosi smične čvrstoće i smičnoga modula elastičnosti. Valja napomenuti da su ove veličine izračunate uz malu grešku. Razlog tome je što u izraz (2.5) ulazi i deformacija u poprečnom smjeru u odnosu na uzdužnu os epruvete  $\varepsilon_y$ , koja u ispitivanju nije mjerena. Vrijednost koja je uvrštena u izraz (2.5) dobivena je kao:

$$\varepsilon_y = \frac{b - b_0}{b_0}, \quad (2.8)$$

gdje je  $b_0$  – početna širina uzorka,  $b$  – širina uzorka nakon pucanja epruvete. Uz uvođenje takvog pojednostavljenja dobivamo smičnu čvrstoću i modul smičnosti prikazane u tablici 9 skupa s ostalim relevantnim podacima.

**Tablica 10. Podatci iz ispitivanja uzorka  $\pm 45^\circ$**

$G_{12}$ , GPa	$S$ , MPa	$F_L$ , N	$\sigma_m$ , MPa	$\varepsilon_m$ , %
3,86	61,37	13464	246,2	13,89

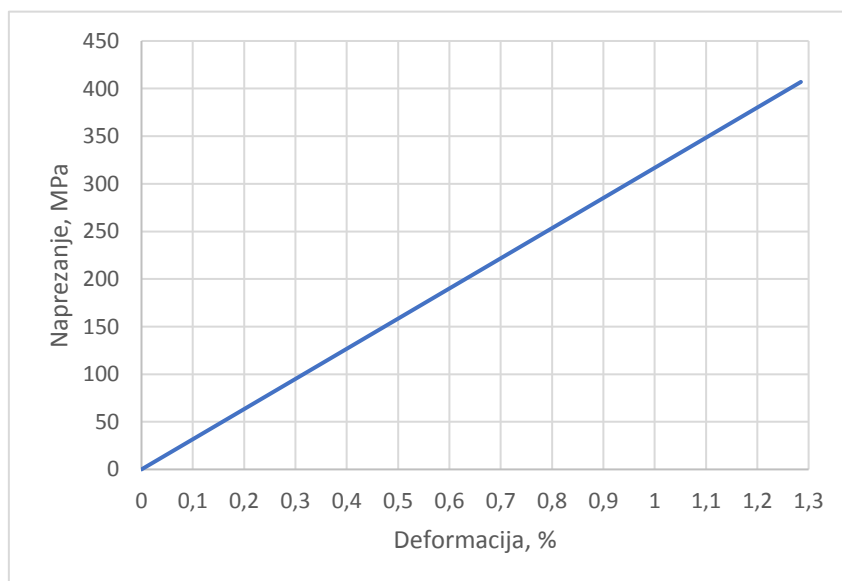
Prema dostupnim podacima na stranicama proizvođača ovog tkanja, smična čvrstoća dobivena ispitivanjem koristeći metodu savijanja kratke grede (eng. *Short Beam Method*), prema [21] iznosi 64,66 MPa. Slomljena epruveta je prikazana na slici 24. Zanimljivo je primijetiti da, iako se radi o istom materijalu, kod uzoraka s ovakvom orijentacijom slojeva prevladava duktilni lom dok je kod tkanja s orijentacijom slojeva 0/90° riječ o krhkom lomu.



Slika 24. Popušteni uzorak sa slojevima tkanja  $\pm 45^\circ$

#### 2.2.5. Proizvoljni uzorak

Ovaj uzorak ima specifičan raspored slojeva karakterističan za vanjske dijelove automobila (npr. hauba). Dijagram naprezanje – deformacija je prikazan na slici 25 a tablica 10 prikazuje samo lomnu silu, vlačnu čvrstoću uzorka i maksimalnu deformaciju. Ostala mehanička svojstva su ista kao u odgovarajućim slojevima ranije prikazanih uzoraka.



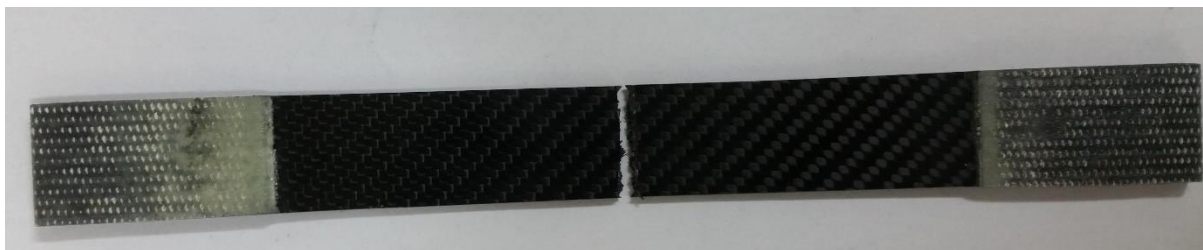
Slika 25. Dijagram ovisnosti naprezanja o deformaciji za proizvoljni uzorak



**Tablica 11. Podatci iz ispitivanja proizvoljnog uzorka**

$F_{\max}$ , N	$\sigma_{\max}$ , MPa	$\varepsilon_{\max}$ , %
29399	433,4	1,28

Na slici 26 je prikazana je epruveta nakon popuštanja. To je ujedno i eksperimentalno idealno mjesto popuštanja. Naime, na sredini uzorka utjecaj rubnih uvjeta na naprezanje je zanemariv.

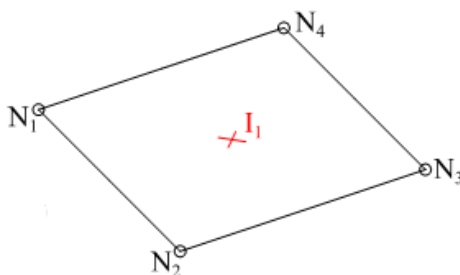
**Slika 26. Popušteni proizvoljni uzorak**

### 3. NUMERIČKA ANALIZA

Numerička analiza popuštanja epruveta napravljena je metodom konačnih elemenata. U idućem dijelu rada objašnjen je proračunski model uzoraka te su prikazani i analizirani rezultati.

#### 3.1. Proračunski model

Za sve analize vrijedi pretpostavka o ravninskom stanju naprezanja. Sukladno tome, geometrija uzoraka diskretizirana je dvodimenzionalnim ljuskastim konačnim elementima prvog reda s reduciranom integracijom koji u programu Abaqus nose oznaku S4R. Svaki element ima po četiri čvora s 6 stupnjeva slobode po čvoru – tri translacije i tri rotacije [13] (ne sadrže rotaciju oko osi paralelne s normalom ljuske). Ljuskasti konačni element s označenim čvorovima i točkom integracije prikazan je na slici 27.



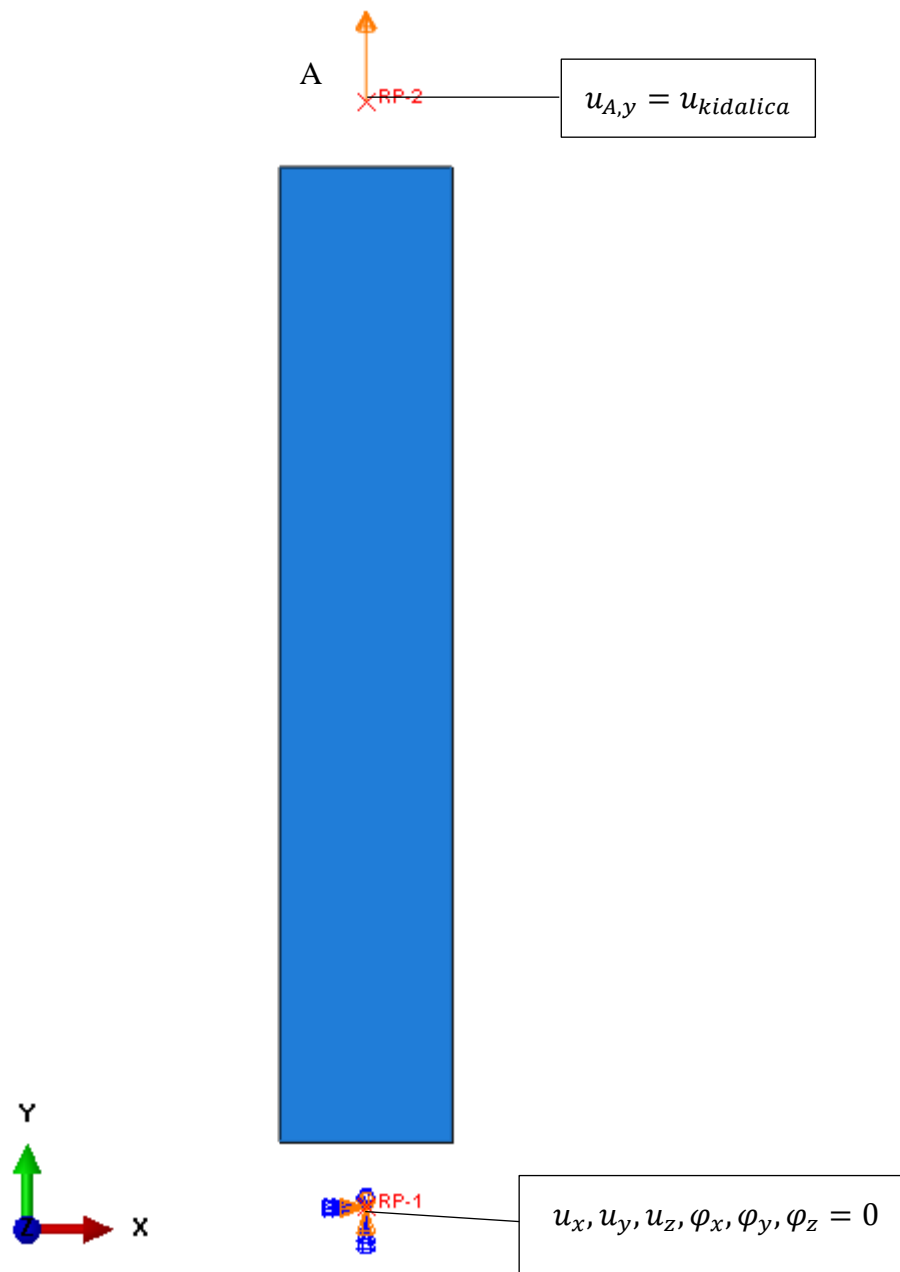
Slika 27. Ljuskasti konačni element S4R – Abaqus

Budući da nas zanima isključivo ponašanje materijala od ugljičnih vlakana, uzorci su modelirani na način da su izostavljena ojačanja od staklenog tkanja na rubovima epruvete. Donji rub epruvete je uklješten, a na gornjem rubu je zadan pomak koji je jednak pomaku čeljusti kidalice. I jedan i drugi rubni uvjet su zadani preko referentnih točaka (engl. *Reference Point*) koje su s odgovarajućim rubovima spojene kinematskom vezom (engl. *Kinematic Coupling*). Kinematska veza funkcionira na način da stupnjeve slobode na odgovarajućem rubu uzorka povezuje sa stupnjevima slobode gibanja krutog tijela referentne točke [13]. Kinematska veza je prikazana na slici 28.



Slika 28. Prikaz korištenih kinematskih veza za definiranje rubnih uvjeta

Rubni uvjeti modela su isti za sve napravljene analize i prikazani su na slici 29. Pomak je dodijeljen u 1000 inkremenata kako bi se što preciznije mogao uhvatiti trenutak popuštanja svih slojeva.



Slika 29. Rubni uvjeti

Materijal je definiran kao linearno – elastičan za svaku analizu osim za analizu uzorka s vlaknima pod  $\pm 45^\circ$  radi toga što s linearnim materijalnim modelom ne možemo dovoljno točno opisati nelinearni odziv ovog uzorka. Za analizu uzorka s vlaknima pod  $\pm 45^\circ$  korišten je elastoplastični materijalni model sa izotropnim očvršnućem. Sve analize su geometrijski linearne.

Podatci za korištene materijale su prikazani u tablici 11. Podatci sa zvjezdicom označava da su preuzeti iz literature [12].

**Tablica 12. Materijalni podatci za korištene slojeve**

	$E_1$ , GPa	$E_2$ , GPa	$\nu_{12}$	$G_{12}$ , GPa	$X_t$ , MPa	$X_c$ , MPa	$Y_t$ , MPa	$Y_c$ , MPa	$S$ , MPa
Jednosmjerni	122	6,3	0,3*	5*	2171	1600*	35,9	150*	55*
Tkanje	69	69	0,1*	3,86	492	473*	492	473*	61,4

### 3.2. Rezultati

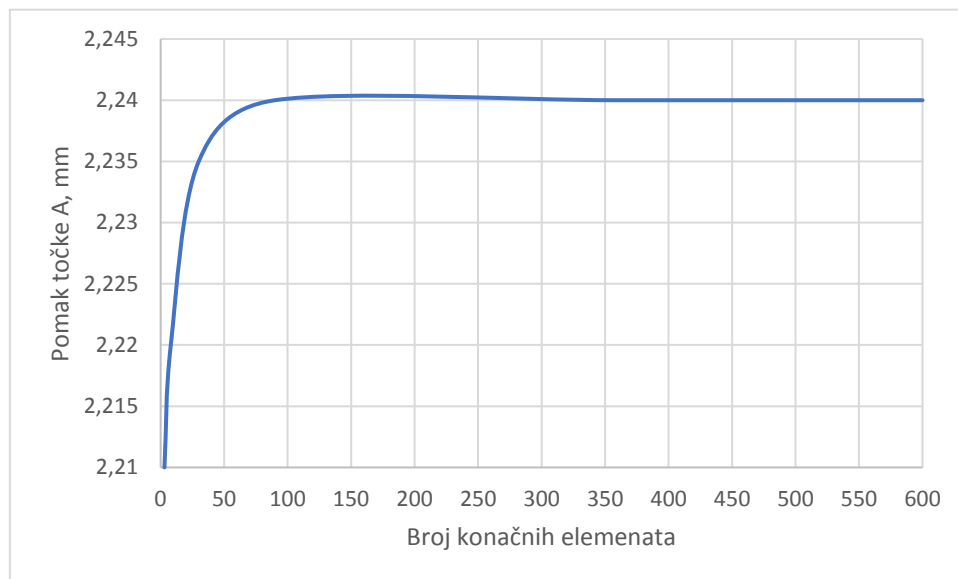
Za svaku analizu prikazane su konture različitih kriterija popuštanja te usporedba rezultata vlačne čvrstoće s rezultatima iz eksperimenta. Vrijednost vlačne čvrstoće za svaku analizu definirana je kao uprosječno naprezanje dobiveno kao omjer vlačne sile na uzorak u trenutku popuštanja i početne površine uzorka. Kriterij popuštanja se vizualizira tzv. indeksom popuštanja (eng. *Failure Index*)  $R$  koji je definiran na sljedeći način [13]. Ako za proizvoljno (ravninsko) stanje naprezanja vrijedi:

$$\left\{ \frac{\sigma_1}{R}, \frac{\sigma_2}{R}, \frac{\tau_{12}}{R} \right\} \rightarrow \text{popuštanje.} \quad (3.2)$$

To je skalar s kojim je potrebno pomnožiti sve komponente naprezanja kako bi bili na površini popuštanja. Ako je veći od 1 znači da je na tom mjestu došlo do popuštanja.

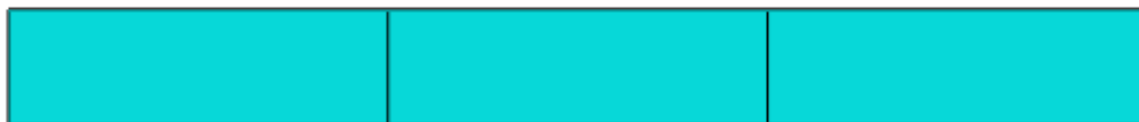
Dijagrami konvergencije neće biti prikazani za svaki uzorak posebno već samo za jednosmjerni uzorak pod  $0^\circ$ . Razlog tome je činjenica da imamo jednostavnu geometriju i opterećenje, odnosno uvjete koji mogu biti dovoljno točno opisano s jako malim brojem konačnih elemenata. S obzirom da su korišteni poprilično mali elementi (za ovakav problem), kako bi se pokušao dobiti točan iznos sile, lokacija i oblik presjeka u kojem epruveta popusti, konvergencija rezultata pomaka je ostvarena u svakoj analizi.

Slika 30 prikazuje konvergenciju pomaka točke A prikazane na slici 29.

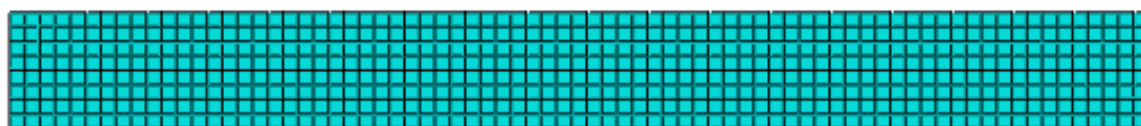


**Slika 30. Dijagram konvergencije pomaka točke A**

Na slici 31 prikazana je najgrublja i najfinija korištena mreža za pokazivanje konvergencije. U svim analizama korištena je mreža sa 600 konačnih elemenata.



a)

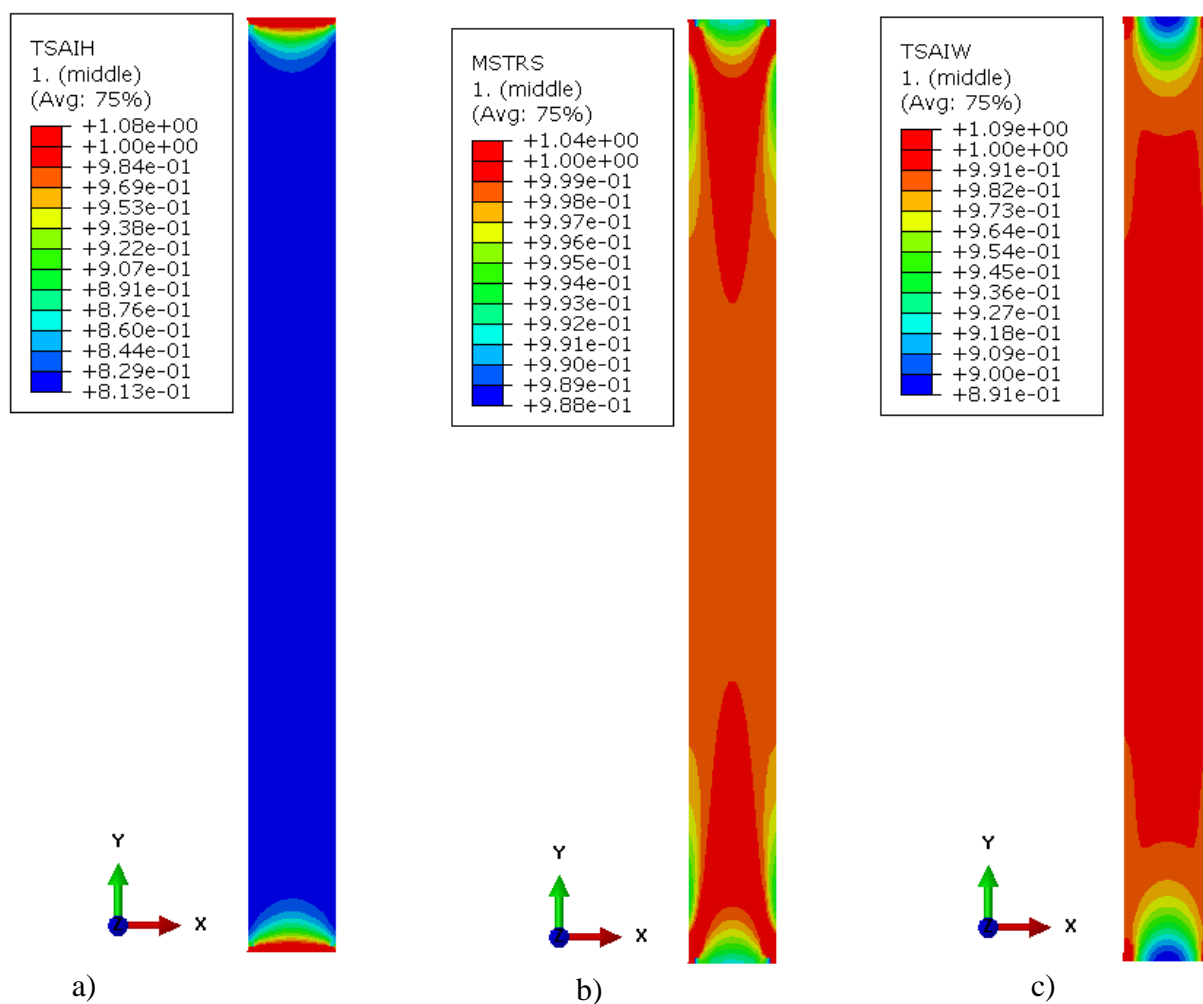


b)

**Slika 31. Mreže konačnih elemenata za pokazivanje konvergencije: a) 3 KE, b) 600 KE**

### 3.2.1. Jednosmjerni uzorak – $0^\circ$

Na slici 32 su prikazane su konture indeksa popuštanja na deformiranom obliku epruvete u trenutku kada dođe do popuštanja svakog elementa po širini uzorka. Crvena boja označava elemente koji su popustili.



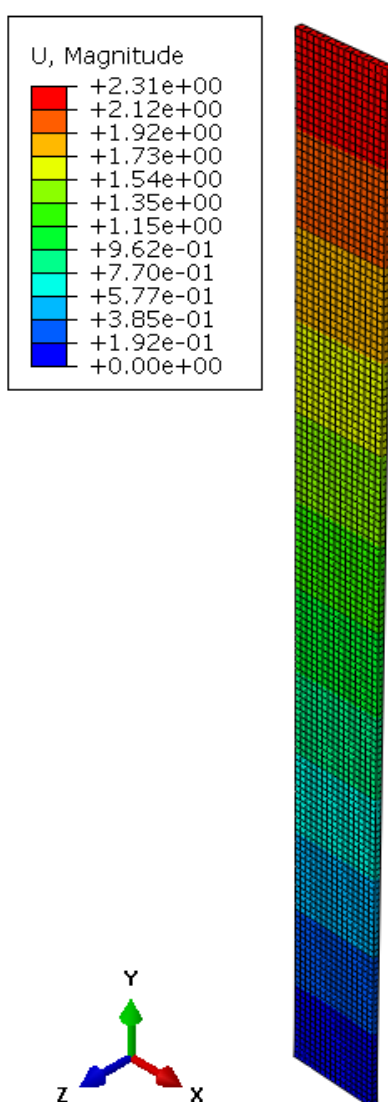
**Slika 32. Indeks popuštanja u trenutku popuštanja uzoraka: a) Tsai-Hill, b) Kriterij maksimalnih naprezanja, c) Tsai-Wu**

U tablici 12 su uspoređene vlačne čvrstoće promatranih kriterija popuštanja s onom iz eksperimenta.

**Tablica 13. Usporedba vlačnih čvrstoća numerike i eksperimenta za jednosmjerni uzorak  $0^\circ$**

	Tsai-Hill	Tsai-Wu	Maks. naprezanja	Eksperiment
$\sigma_m$ , MPa	1681,4	2049,5	2061	2171
Odstupanje,%	-22,55	-5,60	-5,07	-

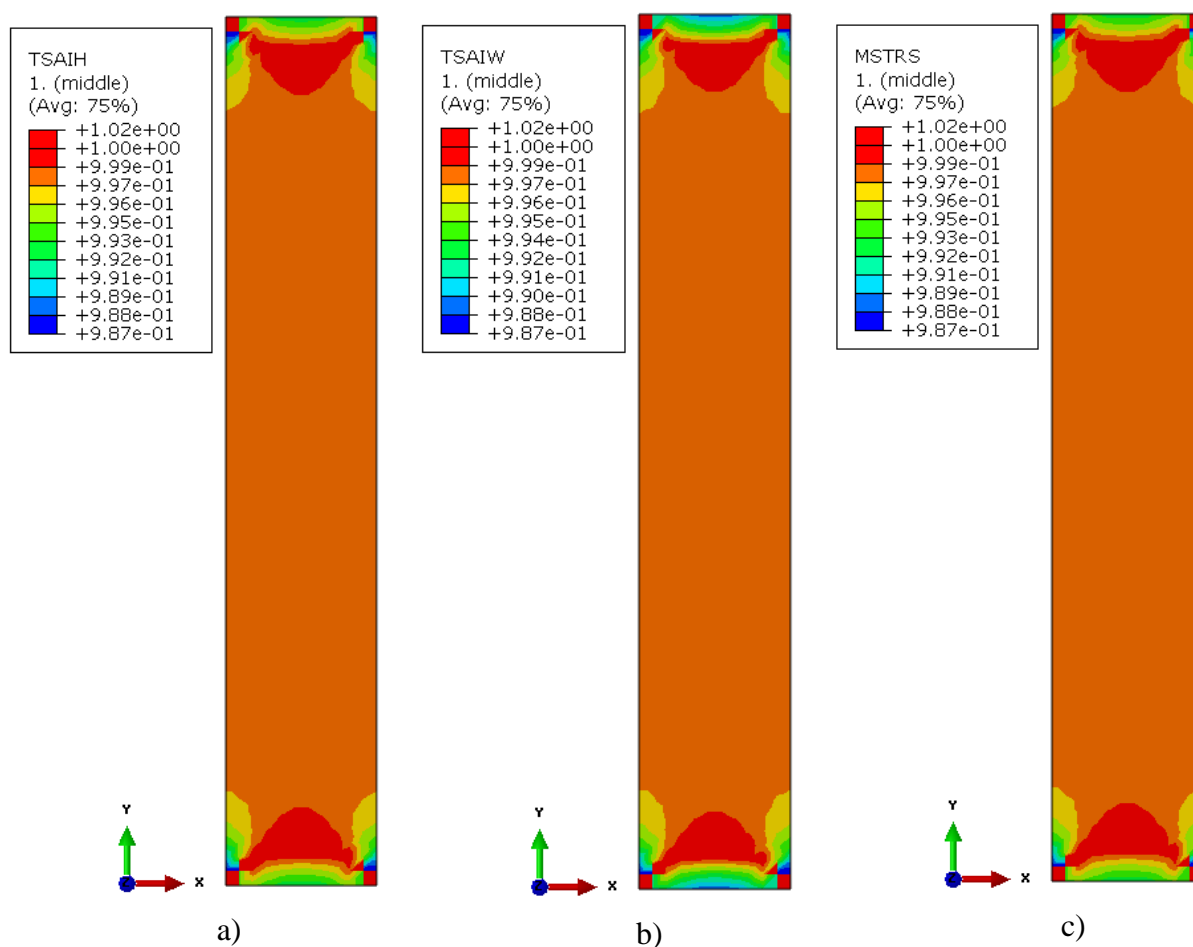
Iz prikazanih rezultata može se uočiti da je vlačna čvrstoća kriterija najvećih naprezanja najbliža vlačnoj čvrstoći dobivenoj eksperimentom što odgovara literaturi [12] po kojoj se ova teorija najviše koristi za slučajeve opterećenja u smjeru vlakana i okomito na njih jer tada daje najbolje rezultate. Tsai – Wu kriterij također daje dobre rezultate, ali i kvalitativno najtočnije opisuje popuštanje ove vrste uzorka u kojem na ispitivanju naglo dolazi do popuštanja cijelog segmenta materijala između hvataljki kidalice. Tsai – Hill kriterij ne daje zadovoljavajuće rezultate za ovaj tip uzorka. Deformirani oblik s konturama pomaka u trenutku popuštanja prikazan je na slici 33. Uključena je opcija vizualizacije debljine ljuskastih elemenata.



Slika 33. Deformirani oblik s konturama pomaka za jednosmjerni uzorak  $0^\circ$

### 3.2.2. Jednosmjerni uzorak – 90°

Slika 34 prikazuje konture indeksa popuštanja za različite kriterije.



Slika 34. Indeks popuštanja u trenutku popuštanja uzoraka: a) Tsai-Hill, b) Tsai-Wu, c) Kriterij maksimalnih naprežanja

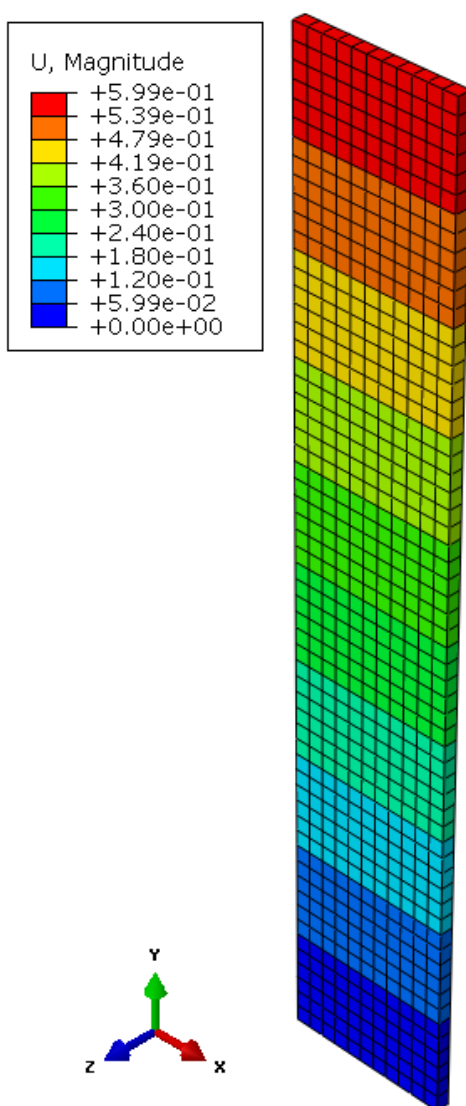
U tablici 13 prikazane su vrijednosti vlačne čvrstoće i odstupanja istih od eksperimenta.

Tablica 14. Usporedba vlačnih čvrstoća numerike i eksperimenta jednosmjerni uzorak 90°

	Tsai-Hill	Tsai-Wu	Maks. naprežanja	Eksperiment
$\sigma_m$ , MPa	34,1	34,1	34,1	35,9
Odstupanje	-5,01	-5,01	-5,01	-



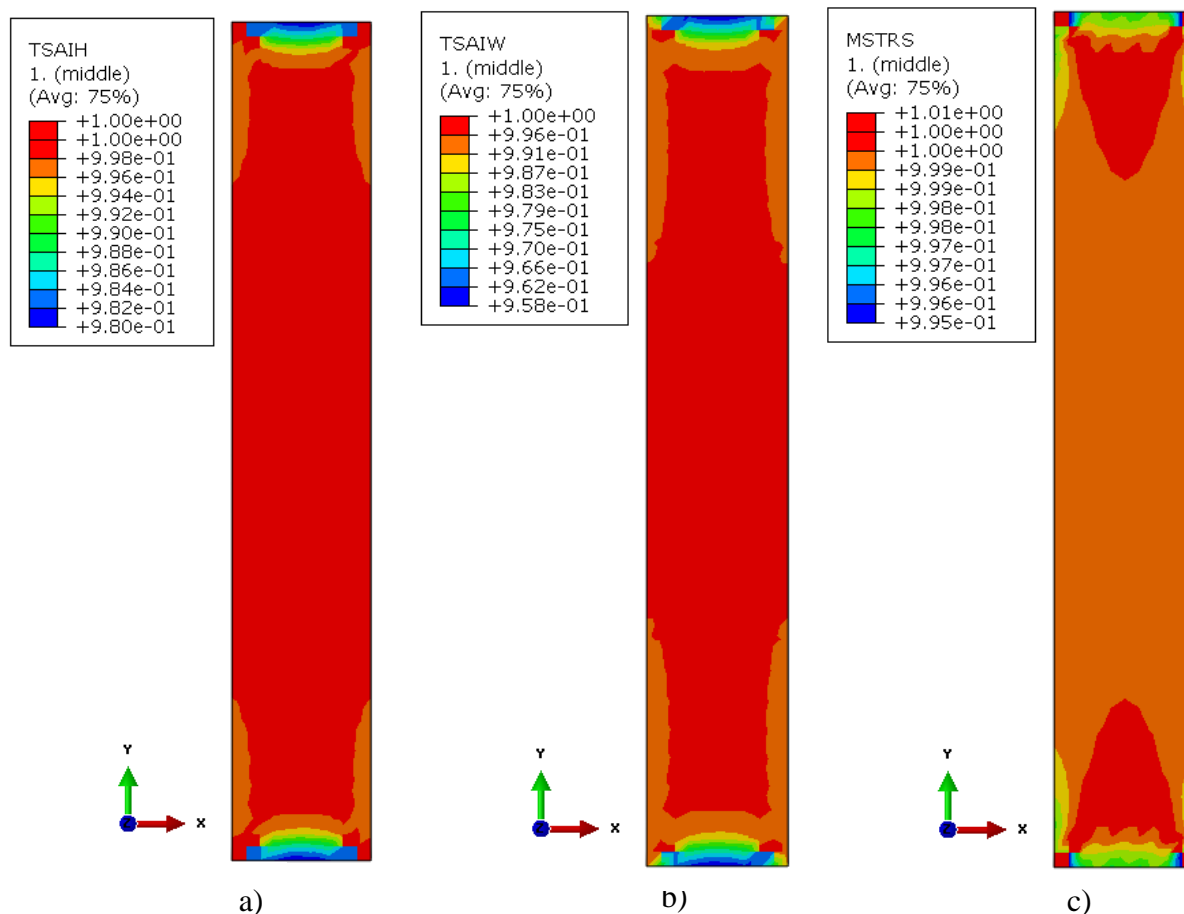
Rezultati analiza su jednaki za svaki kriterij popuštanja. To se može objasniti prema slikama 9 i 10 na kojima se vidi da su, za slučaj naprezanja okomitom na smjer vlakana ( $\sigma_2 \neq 0, \sigma_1 \cong 0$ ) krivulje popuštanja skoro potpuno horizontalne. Sveukupno odstupanje od eksperimentalnih rezultata je iznosi oko 5 % i jednako je kao u slučaju uzoraka s vlaknima u smjeru opterećenja. Na slici 35 su prikazane konture pomaka na deformiranom obliku epruvete s uključenom vizualizacijom debljine ljuskastih elemenata.



**Slika 35.** Deformirani oblik sa konturama pomaka za jednosmjerni uzorak 90°

### 3.2.3. Tkanje – 0°

Slika 36 prikazuje konture indeksa popuštanja za korištene kriterije popuštanja.



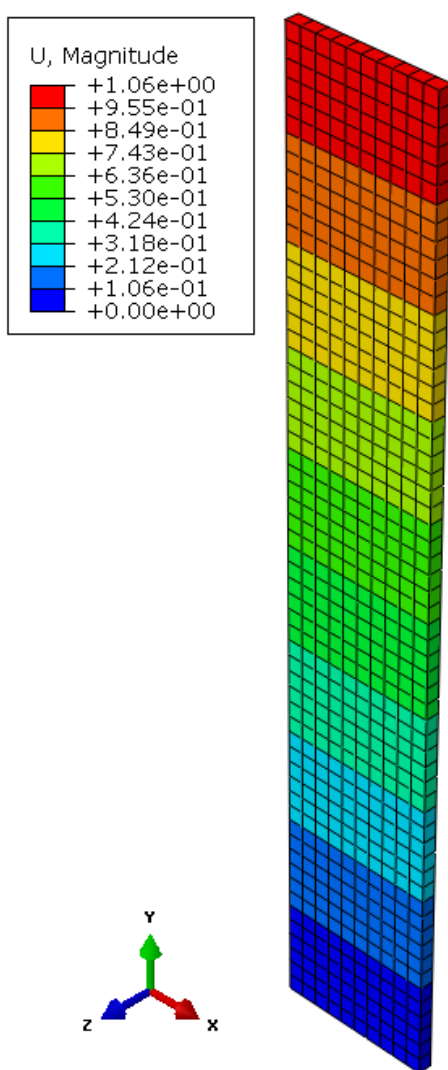
**Slika 36. Indeks popuštanja u trenutku popuštanja uzoraka: a) Tsai-Hill, b) Tsai-Wu, c) Kriterij maksimalnih naprezanja**

U tablici 14 prikazane su vrijednosti vlačne čvrstoće.

**Tablica 15. Usporedba vlačnih čvrstoća numerike i eksperimenta za uzorak od tkanja 0/90°**

	Tsai-Hill	Tsai-Wu	Maks. naprezanja	Eksperiment
$\sigma_m$ , MPa	461,9	463,1	463,7	491,8
Odstupanje	-6,12	-5,87	-5,75	-

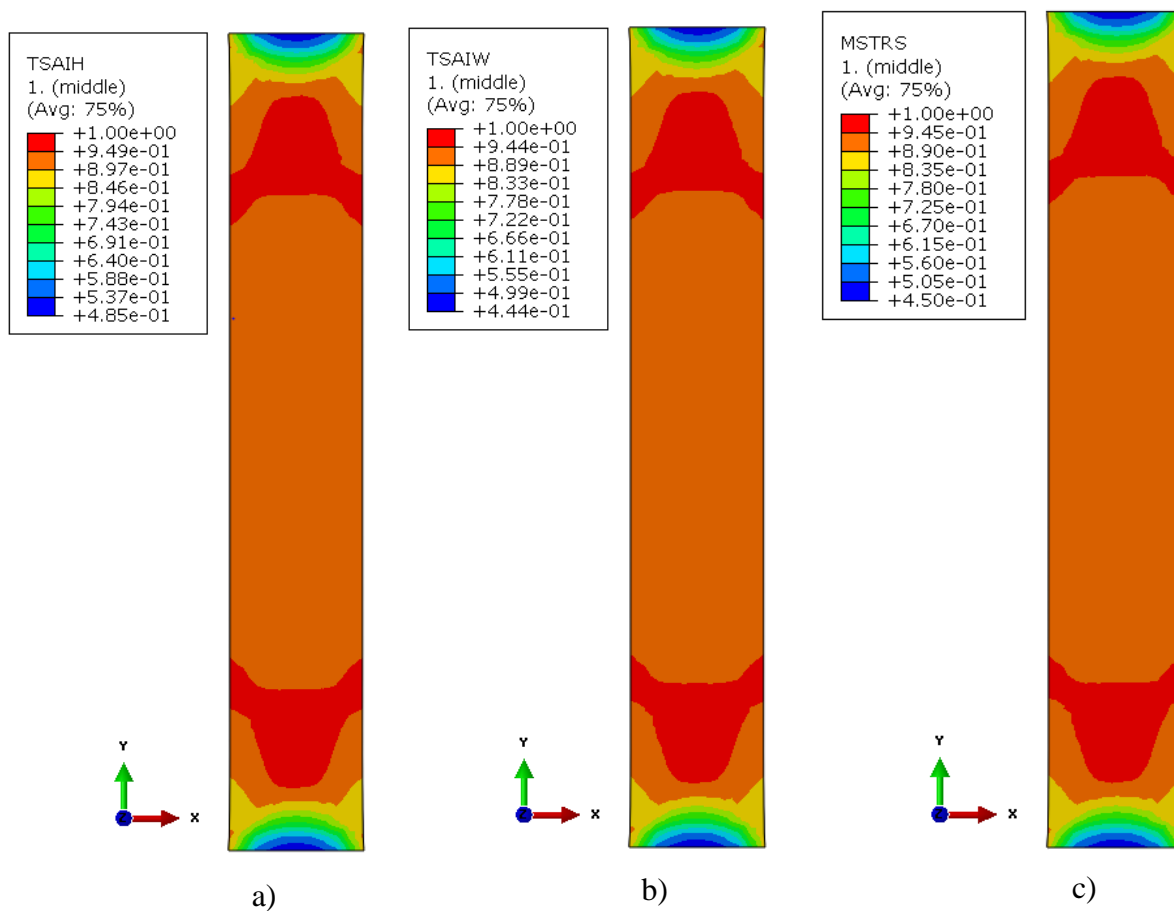
Analiziranjem rezultata vidi se da kriterij maksimalnih naprezanja daje najtočniju vlačnu čvrstoću. Odstupanja između pojedinih kriterija su mala radi toga što se za sloj tkanja, koje ima jednaka svojstva u smjerovima materijalnih koordinatnih osi 1 i 2, krivulje popuštanja Tsai-Wu i Tsai-Hill kriterija približavaju obliku kružnice. S obzirom da je većina uzoraka iz ove skupine pucala u čeljustima kako je prikazano na slici 22, kriterij najvećih naprezanja je i najtočnije pokazao lokaciju popuštanja. Deformirani oblik uzorka s konturama pomaka i vizualizacijom debljine elemenata je prikazan na slici 37.



**Slika 37.** Deformirani oblik s konturama pomaka za uzorak s tkanjem 0/90°

### 3.2.4. Tkanje - $\pm 45^\circ$

Na slici 38 su prikazane su konture indeksa popuštanja na deformiranom obliku epruvete, a tablica 15 prikazuje čvrstoće koje odgovaraju trenutku popuštanja epruvete u analizama i eksperimentu.



**Slika 38. Indeks popuštanja u trenutku popuštanja uzoraka: a) Tsai-Hill, b) Tsai-Wu, c) Kriterij maksimalnih naprezanja**

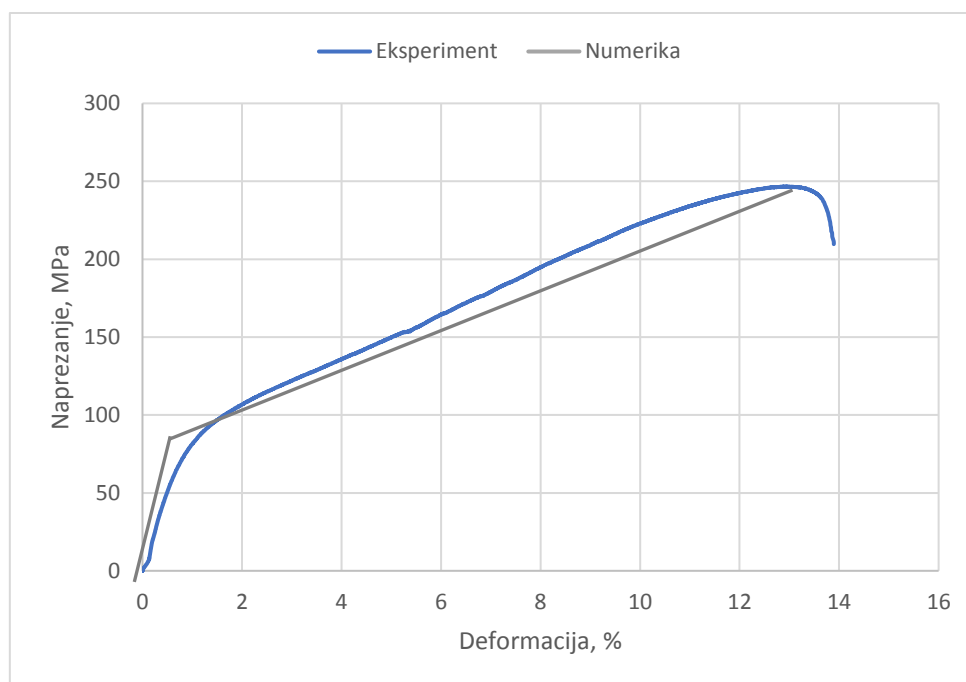
**Tablica 16. Usporedba vlačnih čvrstoća numerike i eksperimenta**

	Tsai-Hill	Tsai-Wu	Maks. naprezanja	Eksperiment
$\sigma_m$ , MPa	157,5	160,45	158,5	246,2
Odstupanje	-36,03	-34,83	-35,62	-

Za ovaj slučaj vidimo da postoje značajna odstupanja iznosa vlačnih čvrstoća od vlačne čvrstoće dobivene iz eksperimenta. Do odstupanja je došlo iz više razloga.

Prvi je radi toga što je u ovom uzorku popuštanje uvjetovano sa smičnom čvrstoćom čija vrijednost dobivena eksperimentom nije realna. Naime, prema izrazu (2.4) (preuzetom iz norme) kao smična čvrstoća uzorka uzima se smično naprezanje pri kojem dolazi do 5% smične deformacije uzorka. S obzirom da je dopuštena kutna deformacija deformacija pri popuštanju epruvete skoro 14% jasno je da ova metoda nije pogodna za određivanje smične čvrstoće materijala visoke istezljivosti. Metoda je prihvatljiva samo za dobivanje iznosa modula smičnosti.

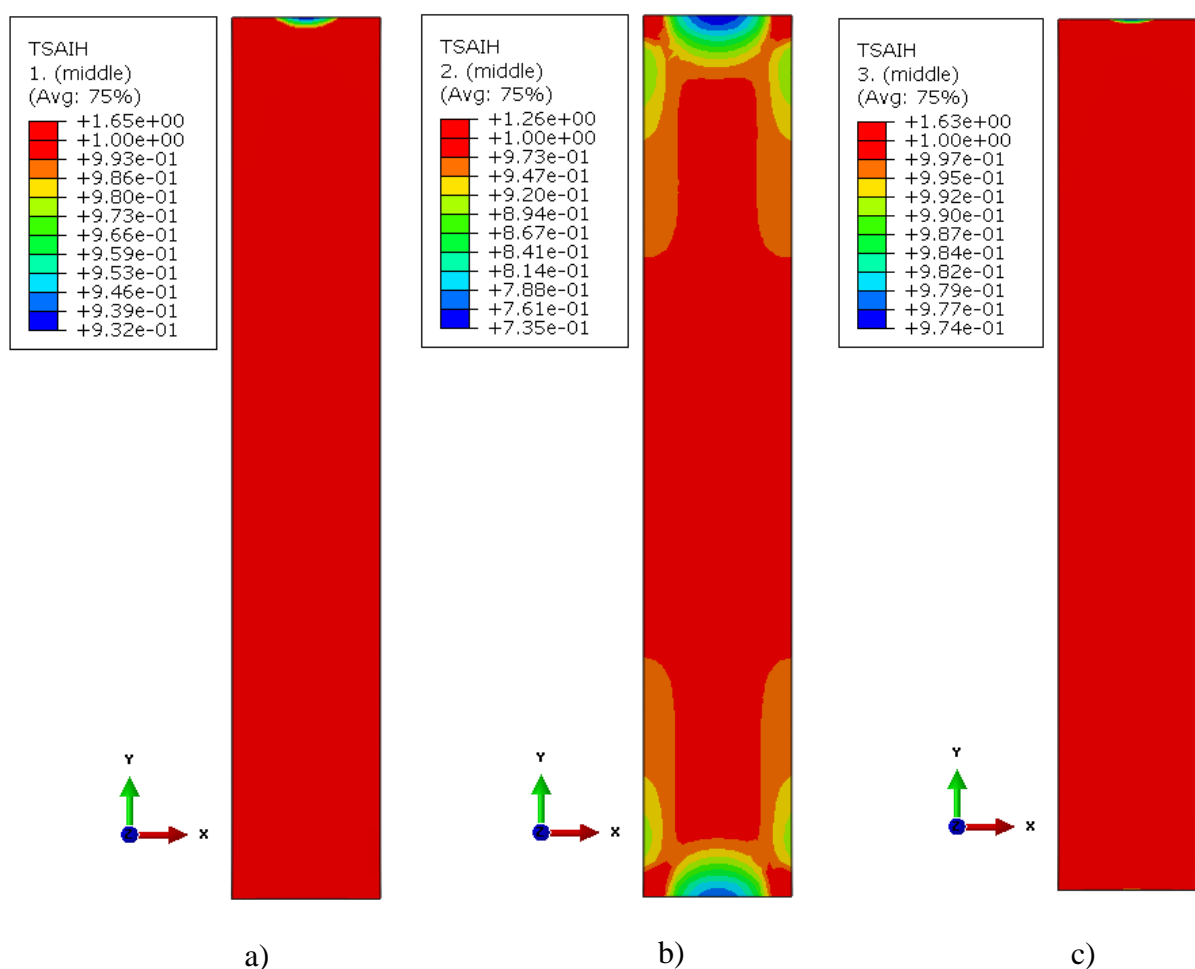
Drugi izvor odstupanja rezultata je nelinearni odziv epruvete koji je u numeričkoj analizi dobiven na način da je definirana materijalna nelinearnost, odnosno izotropno plastično očvršćenje. Da bi definirali bilinearno elastoplastično ponašanje materijala u programu Abaqus, potrebno je definirati dvije točke. Prva točka označava naprezanje pri kojem materijal ulazi u plastično područje (granica tečenja), a druga točka služi da se definira nagib pravca koji predstavlja plastični modul. Ponašanje kompozitnog uzorka s vlaknima pod  $\pm 45^\circ$  u literaturi je navedeno kao pseudo-plastično [19] pa, u načelu, plastično očvršćenje ne opisuje realno ponašanje materijala. Na slici 39 je prikazan dijagram ovisnosti naprezanja o deformaciji uzorka s rezultatima iz ispitivanja i iz provedene numeričke analize.

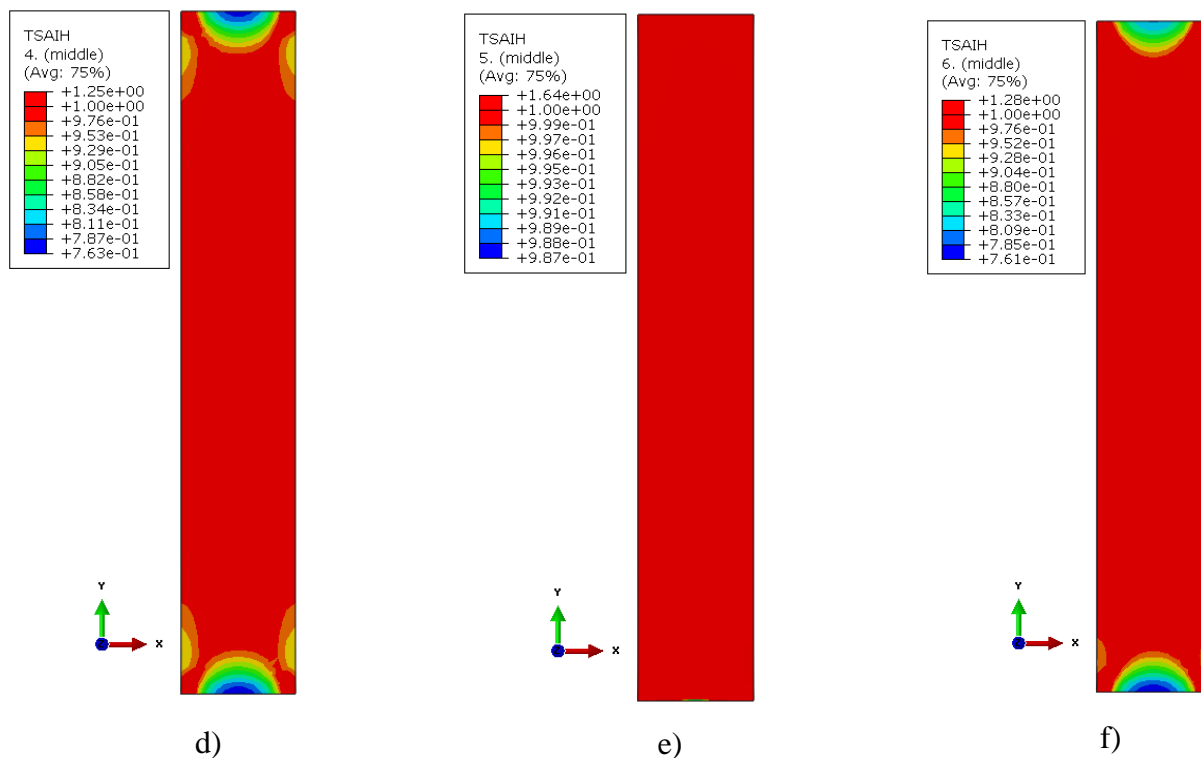


**Slika 39.** Dijagram ovisnosti naprezanja o deformaciji uzorka s tkanjem pod  $\pm 45^\circ$

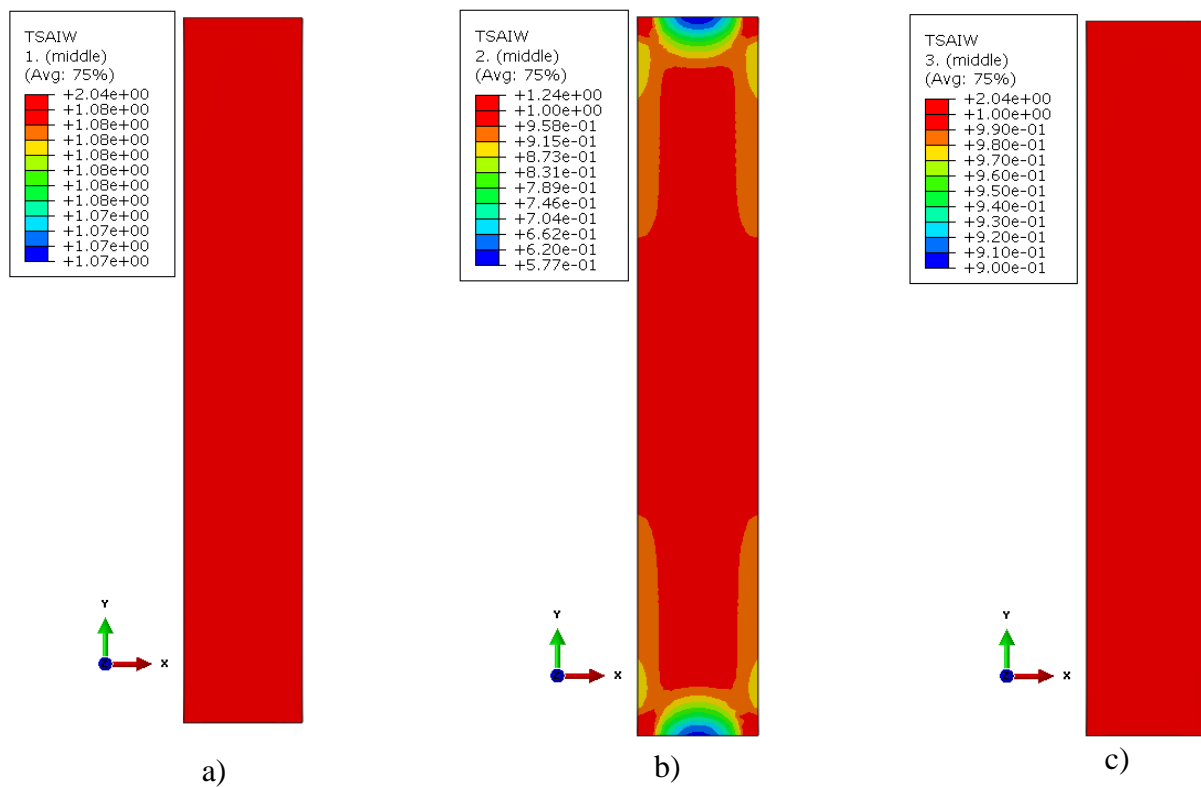
### 3.2.5. *Proizvoljni uzorak*

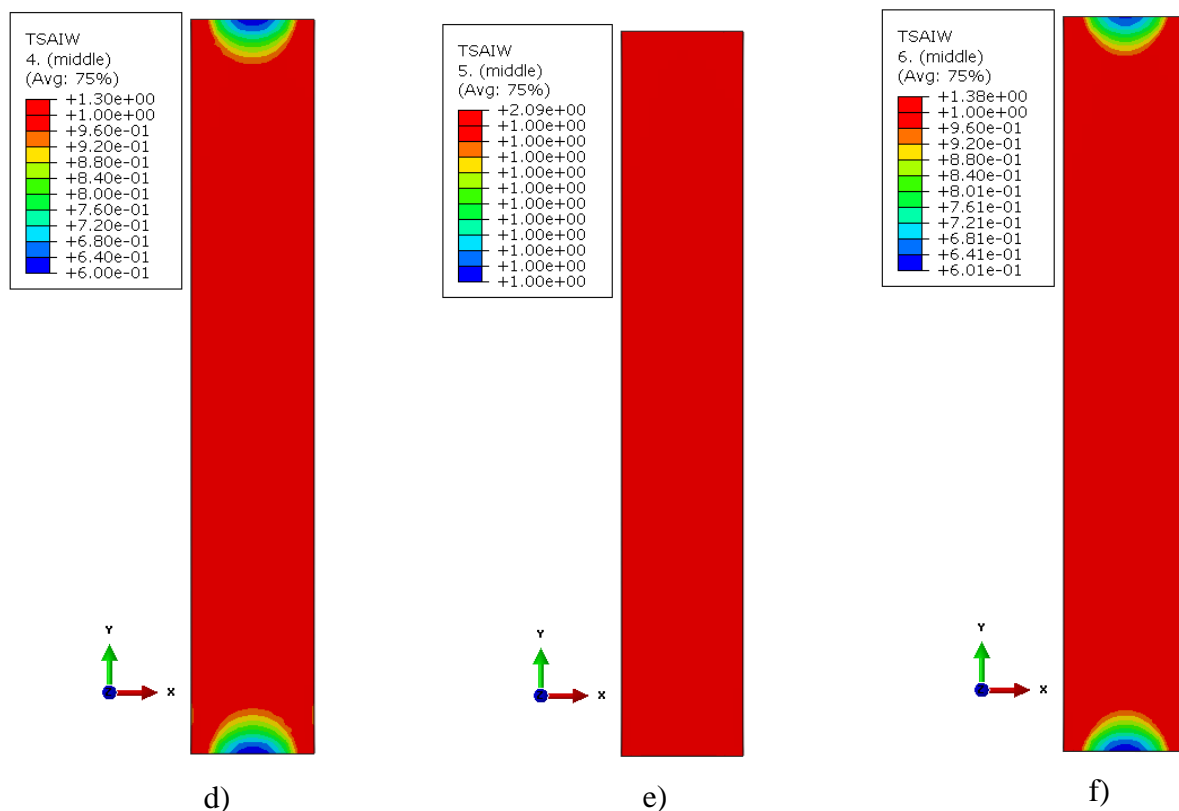
S obzirom da je ovaj uzorak napravljen od različitih slojeva potrebno je analizirati popuštanje svakog sloja zasebno. Naprezanje koje je proglašeno vlačnom čvrstoćom odgovara uprosječenom naprezanju u trenutku kada je po cijeloj širini presjeka popustio svaki sloj kompozita. Radi toga, na slikama 40-42 prikazane su konture indeksa popuštanja na svakom sloju kompozita pri opterećenju kada je cijeli uzorak popustio, za svaki razmatrani kriterij popuštanja



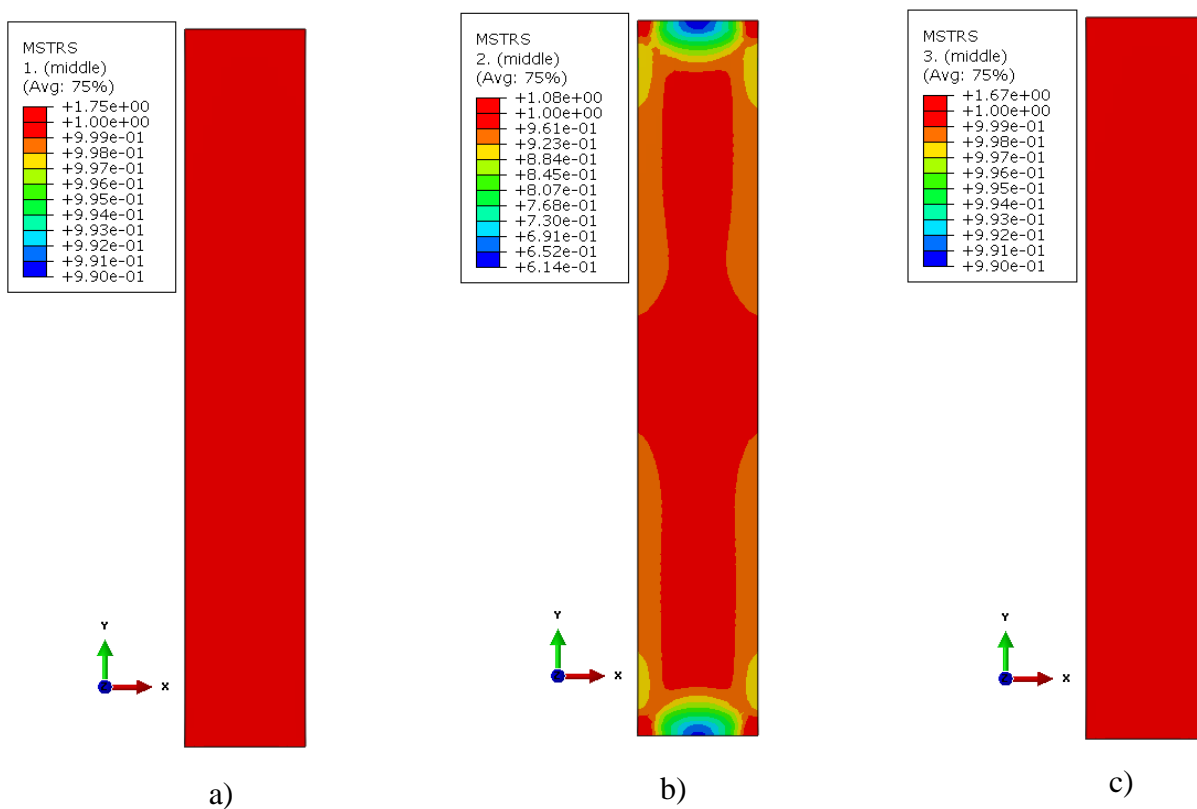


**Slika 40. Indeks popuštanja prema Tsai-Hill kriteriju: a) 1. sloj-0°, b) 2. sloj-45°, c) 3. sloj-0°, d) 4. sloj-45°, e) 5. sloj-0°, f) 6. sloj-45°**

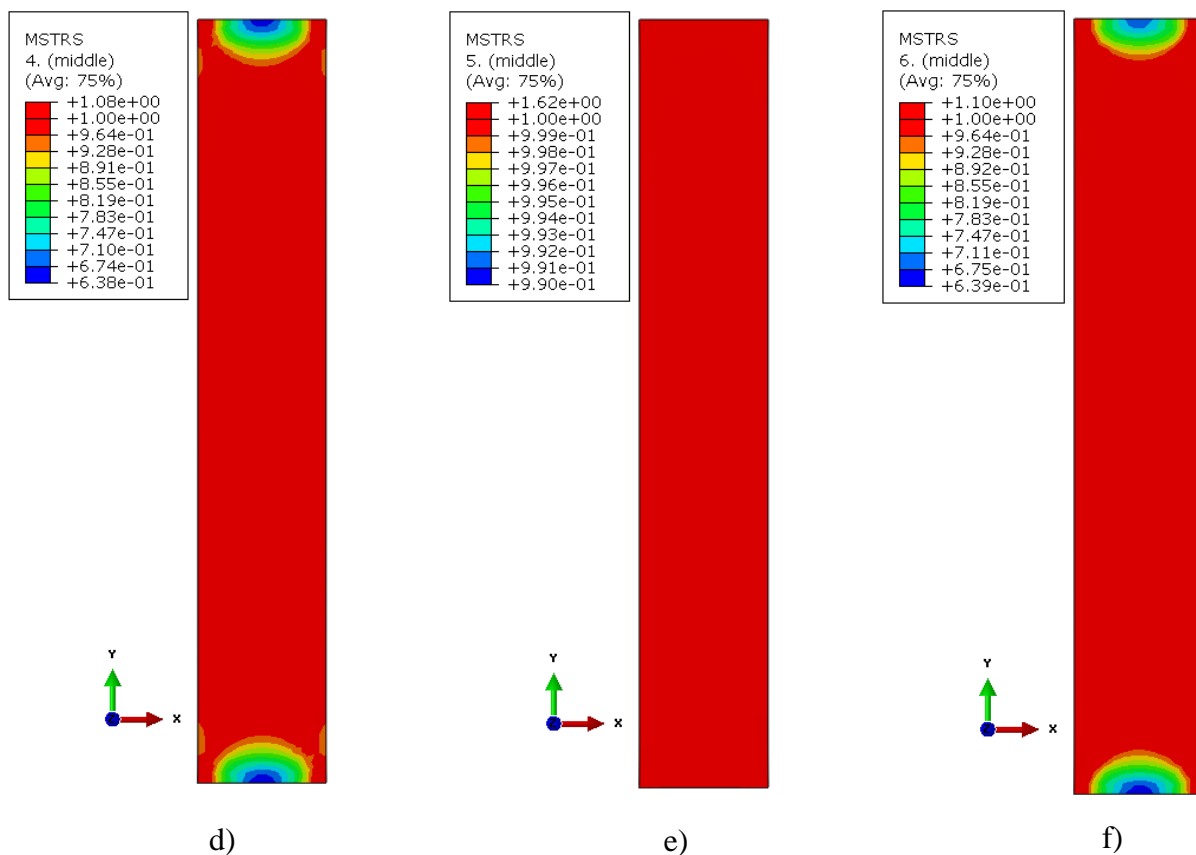




**Slika 41. Indeks popuštanja prema Tsai-Wu kriteriju: a) 1. sloj-0°, b) 2. sloj-45°, c) 3. sloj-0°, d) 4. sloj-45°, e) 5. sloj-0°, f) 6. sloj-45°**







**Slika 42. Indeks popuštanja prema kriteriju maksimalnih naprezanja: a) 1. sloj-0°, b) 2. sloj-45°, c) 3. sloj-0°, d) 4. sloj-45°, e) 5. sloj-0°, f) 6. sloj-45°**

Iz gornjih slika vidi se da su posljednji popuštali slojevi s vlaknima pod  $\pm 45^\circ$ . U trenucima popuštanja cijelog uzorka svi elementi u slojevima pod  $0/90^\circ$  su već popustili. Razlog tome je što su tkanja s vlaknima pod  $0/90^\circ$  puno kruća i preuzimaju većinu opterećenja.

Tablica 16 s iznosima vlačnih čvrstoća ovog uzorka prikazana je ispod.

**Tablica 17. Usporedba vlačnih čvrstoća numerike i eksperimenta**

	Tsai-Hill	Tsai-Wu	Maks. naprezanja	Eksperiment
$\sigma_m$ , MPa	441,3	521,9	489,3	433,4
Odstupanje	1,82	20,42	12,90	-

Iz tablice je vidljivo da za ovaj slučaj Tsai-Hill kriterij daje najbolje rezultate. Tsai-Wu kriterij i kriterij maksimalnih naprezanja imaju značajna odstupanja od eksperimenta. U stvarnosti, zbog ranijeg popuštanja slojeva pod  $0/90^\circ$ , u nepopuštenim slojevima bi naglo došlo do povećanja naprezanja te bi i oni ranije popustili pa bi uzorak imao nižu vlačnu čvrstoću nego dobivenu ovim načinom razmatranja.

### 3.2.6. Usporedba rezultata iz HyperWorks programskog paketa

Iste analize su napravljene u programskom paketu HyperWorks s njegovim implicitnim rješavačem OptiStruct. Korišteni su isti kriteriji popuštanja kao u Abaqusu. U tablici 17 su prikazani iznosi vlačne čvrstoće prema kriteriju koji se najviše približio eksperimentu za svaku vrstu uzoraka, te odstupanje od eksperimenta. Kriterij popuštanja koji je najtočnije opisao popuštanje je isti kao u Abaqusu, jedino se razliku vrijednosti samog naprezanja. Generalno, programski paket Abaqus dao je točnija rješenja, iako su odstupanja zanemariva. S obzirom da su se koristili isti kriteriji popuštanja i ulazni podatci, do razlike je vjerojatno došlo zbog razlike u formulaciji korištenih konačnih elemenata.

**Tablica 18. Vlačne čvrstoće dobivene programskim paketom HyperWorks**

	Jednosmjerni- $0^\circ$	Jednosmjerni- $90^\circ$	Tkanje- $0/90^\circ$	Tkanje- $45^\circ$	Proizvoljni uzorak
HyperWorks	2027	33,4	456,4	151,9	450,3
Odstupanje,%	-6,63	-6,96	-7,20	-38,30	3,90

---

## 4. ZAKLJUČAK

U uvodnom dijelu rada dan je pregled tehničkih rješenja koja se koriste kod automobilskih kompozitnih konstrukcija. Kompozitni materijali, zbog kombinacije dobrih mehaničkih svojstava i male mase, nalaze primjenu u raznim granama automobilske industrije. U početku samo kod trkaćih natjecateljskih vozila, a danas ih nalazimo i u automobilima srednje i visoke klase.

Zbog ortotropnih svojstava kompozita ojačanih s vlaknima treba biti oprezan s njihovom primjenom. Kod razvoja konstrukcijskih komponenti od ovakvih materijala velika važnost se pridodaje strukturalnim analizama koje, u kombinaciji sa specifičnim svojstvima kompozita, omogućavaju visoku razinu optimizacije proizvoda.

Za numeričke analize čvrstoće u ovom radu je korištena metoda konačnih elemenata. S obzirom da će rezultati analize biti onoliko dobri koliko su dobri ulazni podatci, prije svega definicija materijala, u sklopu ovog rada napravljena su eksperimentalna vlačna ispitivanja kako bi se došlo do realnih materijalnih parametara. Ispitani su uzorci ugljičnih vlakana u epoksidnoj matrici s različitim rasporedom slojeva, proizvedeni u tvrtki Rimac Automobili. Statička vlačna ispitivanja su napravljena na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku. Ispitano je pet različitih vrsta uzoraka, dva s jednosmjernim slojevima i tri sa slojevima u obliku keper tkanja.

Materijalni podatci dobiveni eksperimentom korišteni su kao ulazni podatci za numeričko modeliranje popuštanja epruveta. Parametri koje nije bilo moguće dobiti vlačnim testom su preuzeti ili iz kataloga dobavljača materijala ili, ukoliko to nije bilo moguće, iz literature. Popuštanje je modelirano korištenjem u industriji najčešće primjenjivanih kriterija popuštanja: kriterij maksimalnih naprezanja, Tsai-Hill i Tsai-Wu kriterij.

Svaki od razmatranih slučajeva osim jednog je opisan sa zadovoljavajućom točnošću s bar jednim od korištenih kriterija popuštanja. Slučaj u kojem je analiziran uzorak s vlaknima pod  $\pm 45^\circ$  nije točno opisan ni s jednim kriterijem popuštanja. Razlog tome ne leži u greškama kriterija već u neprimjerenom vlačnom testu korištenom za dobivanje smične čvrstoće.

Nakon razmatranja rezultata može se zaključiti da kriterij maksimalnih naprezanja najtočnije opisuje situacije u kojima opterećenje djeluje u smjeru vlakana ili okomito na njih. Uzorak s različitim rasporedom slojeva najtočnije je opisan Tsai-Hill kriterijem.

Za točnije rezultate, prije svega je potrebno dobiti točan iznos smične čvrstoće koristeći neku od ostalih metoda. Prema literaturi [22],[23] najtočnije su se pokazale Iosipescu metoda i metoda okvira slike (engl. *Picture Frame Shear Test Method*), no dosta su složenije za izvesti u odnosu na metodu primijenjenu u ovom radu.

Također bilo bi poželjno izvesti tlačni test za definiranje odgovarajućih materijalnih parametara. Test nije izveden u sklopu ovog rada radi toga što bi pri klasičnom tlačnom ispitivanju došlo do izvijanja uzoraka koji moraju biti tanki kako bi mogli popustiti (kapacitet kidalice Laboratorija za eksperimentalnu mehaniku je 50 kN).

Sljedeći korak u numeričkom modeliranju popuštanja bio bi uvođenje mehanizma oštećenja materijala no to je ostavljeno za neki drugi diplomski ili doktorski rad.

---

## LITERATURA

- [1] Ghassemich, E. *Materials in Automotive Application, State of the Art and Prospects, New Trends and Developments in Automotive Industry*, InTech, Marcello Chiaberge, ISBN: 978-953-307-999-8., 2011.,
- [2] McWilliams, A. *Advanced Materials, Lightweight Materials in Transportation*, report, Report Code: AVM056A, 2007.,
- [3] Zhang J., Chaisombat K., He S., Wang C.H. *Glass/Carbon Fibre Hybrid Composite Laminates for Structural Applications in Automotive Vehicles*. In: Subic A., Wellnitz J., Leary M., Koopmans L. (eds) *Sustainable Automotive Technologies 2012*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012.,
- [4] Brooks, R. *Composites in Automotive Applications: Design, Comprehensive Composite Materials*, Volume 6: Design and Applications, Springer, New York, pp. 341-363, 2000.,
- [5] Sehanobish, K.: *Engineering Plastics and Plastic Composites in Automotive Applications*, SAE International, Warrendale, Pa., USA, 2009.,
- [6] *Rimac Automobili*, web: <http://www.rimac-automobili.com/>, svibanj 2017.,
- [7] Brighton, A., Forrest, M., Starbuck, M. Strain rate effects on the energy absorption capability of triaxially braided composite tubes. *Journal of Composite Materials*, 43(20), 2183-2200, 2009.,
- [8] Lee, D.G., Kim, J.W. and Hwang, H.Y. (2004) Torsional fatigue characteristics of aluminium –composite co-cured shafts with axial compressive preload. *Journal of Composite Materials*, 38(9), 737–756. 2004.,
- [9] Elmarakbi, A.: *Advanced Composite Materials for Automotive Applications*, John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, 2014.,
- [10] *Driver News*: [http://driver-news.ru/novinki\\_avto/13095](http://driver-news.ru/novinki_avto/13095), svibanj 2017.,
- [11] Smojver, I.: *Mehanika kompozitnih materijala*, Zagreb, 2007.,
- [12] Kollar, L.P., Springer, G.S.: *Mechanics of Composite Structures*, Cambridge University Press, Cambridge, 2003.,
- [13] *Dassault Systems, Simulia Abaqus 6.10 Documentation*
- [14] *Plastics – General principles for the determination of tensile properties ( ISO 527-1:1993)*,

- 
- [15] Plastics – Determination of tensile properties. Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites (ISO 527-4:1997),
- [16] Plastics – Determination of tensile properties. Test conditions for unidirectional fibre – reinforced plastic composites (ISO 527-5:2009),
- [17] Fibre – reinforced plastic composites. Determination of the in-plane shear stress/shear strain response, including the in-plane shear modulus and strength, by the  $\pm 45^\circ$  tension test method (ISO 14129:1997),
- [18] Pilipović, A., *Proizvodnja kompozitnih tvorevina*, Predavanja, FSB, Zagreb 2017.,
- [19] J.D. Fuller, M.R. Wisnom. Pseudo-ductility and damage suppression in thin ply CFRP angle-ply laminates, 2014,
- [20] Alfirević, I.: *Uvod u tenzore i mehaniku kontinuuma*, Golden marketing, Zagreb 2003.,
- [21] *SHD Composites*, web:  
<http://shdcomposites.com/wp-content/uploads/2016/04/MTC275-TDS-1.pdf> , svibanj 2017.,
- [22] Melin, N.: *The Modified Iosipescu shear test for orthotropic materials*, KTH Engineering Sciences, Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden, 2008.,
- [23] Purslow, D.: *The Shear Properties of Unidirectional Carbon Fibre Reinforced Plastics and their Experimental Determination*, Structures Dept., R.A.E., Farnborough Hants, 1977.